

La Montée des Eaux, les Constats simples, les Mesures complexes, les Résultats controversés!

Sommes nous en mesure de prédire?

20/02/2023

Marcel Terrier La montée des eaux

1

Les Médias de toute sorte bruissent d'annonces catastrophiques prédisant que les océans vont submerger la planète Terre en donnant des causes d'origine humaine liées, entre autre, aux augmentations du CO2 atmosphérique qui, elles, le seraient aussi. Les mécanismes invoqués partent des augmentations de température de l'atmosphère, passent par la fonte des glaces terrestres et par la dilatation thermique des eaux des océans.

Cette intervention se donne pour objectif de rappeler que la paléoclimatologie, qui n'est contestée par personne, annonce que avec l'Homme ou sans l'homme les taux de CO2 ont toujours fluctués, les températures aussi ainsi que le niveau des océans. (Il y a 20000 ans le niveau était plu bas de 120 mètres).

Cette intervention se donne aussi pour objectif de rappeler que toute mesure est un défi qui demande un luxe de précautions pour relever tous les pièges et toutes les incertitudes. Présenter une courbe d'évolution des niveaux moyens en combinant les mesures des satellites et les mesures des marégraphes exigent encore plus de précautions car les références des uns et les références des autres sont différentes et exigent des calages multiples.

A partir de la tomographie sismique dans le manteau, on obtient la Répartition des masses (la vitesse des ondes sismiques dépendant de la Densité du milieu traversé).

On peut donc modéliser le géoïde!

Mais le modèle statique donne des creux là où on observe des bosses,
Et vice-versa...

➔ Nécessité de prendre en compte la convection!!!

20/02/2023

Marcel Terrier La montée des eaux

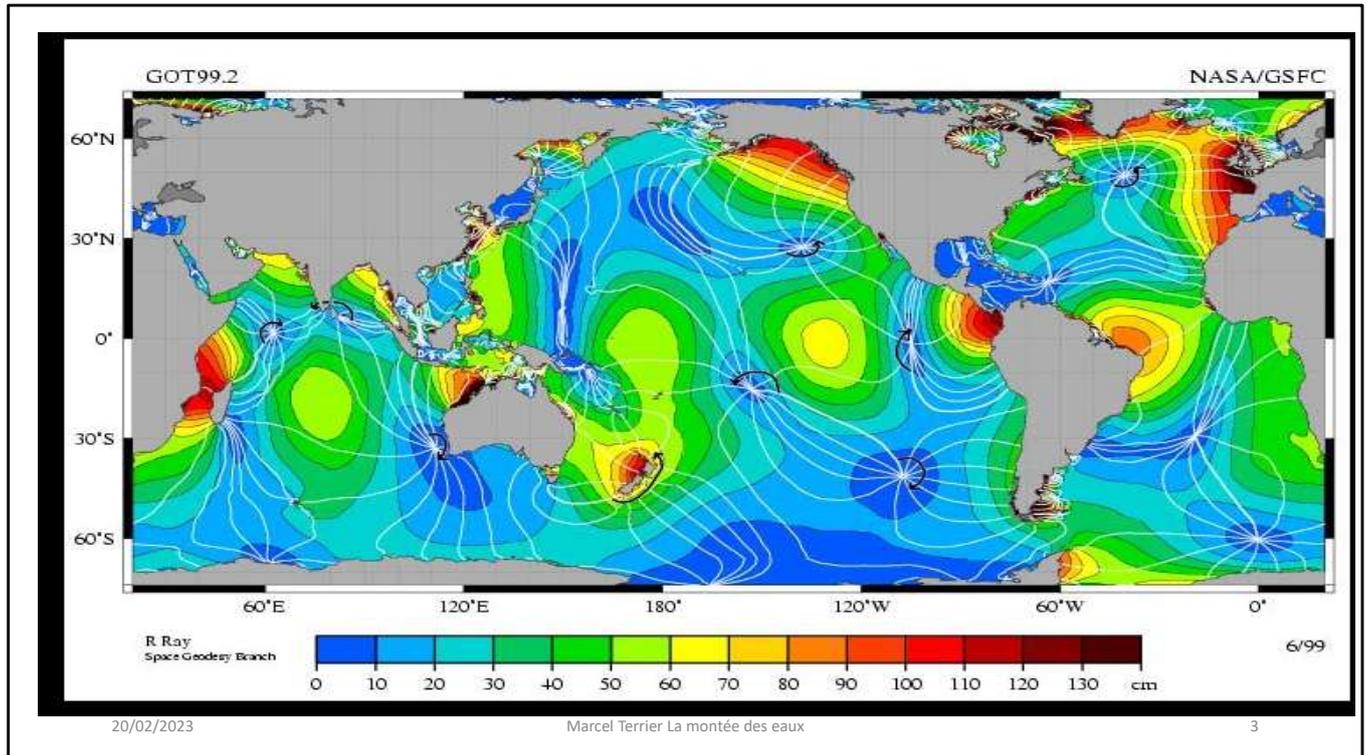
2

Cours Préparation au CAPES Université Pierre & Marie Curie Par Mathieu RODRIGUEZ
rodriguez@geologie.ens.fr Pr. Agrégé en sciences naturelles & doctorant iSTeP-ens

Ici la convection citée est la convection dans le manteau sous la croûte terrestre.

Cette diapo est là pour bien faire la différence entre les modèles statiques de la Terre et les modèles dynamiques. Cet aspect complique les études des variations de niveau des océans!

Commençons avec Tahiti!



Nous commençons par présenter les points amphidromiques par cette carte mondiale. Il faut savoir qu'en ces points les marées lunaires sont faibles voire nulles. Ils permettent de mettre en évidence que la distance entre le fond des océans à cet endroit et la surface ne varie pas au fil du temps. (Cette distance s'appelle eustasie)

Ces points sont des nœuds de vibrations.

Ces vibrations sont des ondes sphériques dont l'étude est difficile.

Les calculs dans le cadre de la gravitation newtonienne débouchent, du fait des aspects dynamiques et vibratoires, sur des équations aux dérivées partielles elliptiques qui ne sont solubles que numériquement.

Seychelles à mi chemin entre Madagascar et Indes.

Terre d'Enderby entre Australie et antarctique. 30°W

Perth au sud ouest de l'Australie

Nouvelle Guinée au nord de l'Australie. Un point à l'est et un autre au nord

Iles de Pâques à l'ouest de Santiago du Chili.

Galapagos sur l'équateur à l'ouest de l'Isthme de Panama

Terre de la reine Maud nord de l'Antarctique 60°E

SRI Lanka sud est de l'Inde 70°E

Tahiti au nord ouest de l'île de Pâques

Hawaï à l'ouest du Mexique.

Terrier le 11 février 2022

LES POINTS AMPHIDROMIQUES

En règle générale, le terme M_2 (semi-diurne et causé par la lune) est la principale harmonique de la marée, contribuant à environ la moitié du marnage, sur une période de 12 h 25 min. Le terme M_2 produit plusieurs points amphidromiques sur les océans, où le marnage est donc extrêmement faible. Autour de ces points, la marée tourne dans un sens ou dans l'autre ; ce sens de rotation n'a par ailleurs aucun lien avec sa situation par rapport à l'équateur.

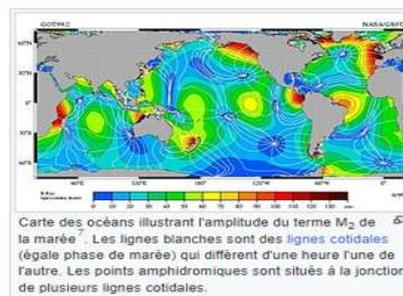
Parmi les points amphidromiques de M_2 :

- Sens trigonométrique : (ici, c'est le contraire => Sens **anti**-trigonométrique)
 - Nord des Seychelles
 - Près de la Terre d'Enderby
 - Au large de Perth, Australie
 - Est de la Nouvelle-Guinée
 - Sud de l'île de Pâques
 - Ouest des Îles Galapagos
 - Nord de la Terre de la Reine-Maud
- Sens anti-trigonométrique : (ici, c'est le contraire => Sens **trigonométrique**)
 - Près de Sri Lanka
 - Nord de la Nouvelle-Guinée
 - Tahiti
 - Entre le Mexique et Hawaï
 - Près du nord des Petites Antilles
 - Est de Terre-Neuve
 - Entre Rio de Janeiro et l'Angola
 - Est de l'Islande

Les îles de Madagascar et de Nouvelle-Zélande sont des points amphidromiques dans le sens que la marée tourne autour d'elles (dans le sens trigonométrique dans les deux cas) en environ 12 heures et demie, mais son amplitude sur leurs côtes n'est pas forcément nulle (et même parfois élevée).

20/02/2023

Marcel Terrier La montée des eaux



Beaucoup de Français ignorent que les marées à Tahiti sont nulles!

Les points les plus connus sont au nombre de 15!

Ce point de départ permet une mise en ambiance: Il est difficile de démontrer que le niveau de la mer monte mais il est facile de constater qu'à beaucoup d'endroits elle ne monte pas du tout.

Le problème de la montée des eaux n'est qu'un problème de justification des mesures faites et des résultats de calculs annoncés. On ne mesure pas toujours ce qu'on pense mesurer et les calculs numériques **dynamiques** apportent leurs lots de surprises.

Exemple: dans le cas des marées lunaires l'enseignement au baccalauréat présente les bourrelets océaniques sur l'axe Terre/Lune alors que pour des raisons vibratoires ils sont sur un axe perpendiculaire à l'axe Terre/Lune!

A propos du changement du niveau des océans dans les zones côtières V. Courtillot , J-L. Le Mouél , et F. Lopes

Résumé Les variations du niveau de la mer, basées sur les données marégraphiques (GSLTG) et la combinaison des données marégraphiques et satellitaires (GSLI) sont soumises à une analyse spectrale singulière (ASS) afin de déterminer leurs tendances et leurs composantes périodiques ou quasi-périodiques. GLSTG augmente de 90 mm de 1860 à 2020, une contribution de 0,56 mm/an au taux d'augmentation moyen. Des périodes annuelles à multidécennales de 90/80, 60, 30, 20, 10/11 et 4/5 ans se retrouvent à la fois dans les données GSLTG et GSLI. Ces périodes correspondent aux périodes commensurables des planètes joviennes et à la combinaison des périodes de Neptune (165 ans), Uranus (84 ans), Saturne (29 ans) et Jupiter (12 ans). Ces mêmes périodes se retrouvent dans les variations du niveau de la mer, le mouvement de rotation du pôle RP et l'évolution de la pression globale PG, suggérant des corrélations physiques. Les premières composantes ASS comprennent l'essentiel de la variance du signal : 95 % pour GSLTG, 89 % pour GSLI, 98 % pour PG, 75 % pour PR. Laplace a dérivé les équations de Liouville-Euler qui régissent la rotation et la translation de l'axe de rotation de tout corps céleste. Il a souligné qu'il fallait tenir compte des moments cinétiques orbitaux de toutes les planètes en sus des attractions gravitationnelles et conclu que l'axe de rotation de la Terre devrait subir des mouvements qui portent les combinaisons des périodes du Soleil, de la Lune et des planètes. Presque toutes les périodes trouvées dans les composantes SSA du niveau de la mer (GSLI et GSLTG), de la pression globale (PG) et de la rotation polaire (RP), de leurs modulations et de leurs dérivées peuvent être associées aux planètes joviennes. Il serait intéressant de rechercher des séries de données sur des périodes plus longues, ce qui permettrait de vérifier si les tendances elles-mêmes pourraient être des segments de composantes ayant des périodicités encore plus longues (par exemple, le cycle de 175 ans de Jose)

20/02/2023

Marcel Terrier La montée des eaux

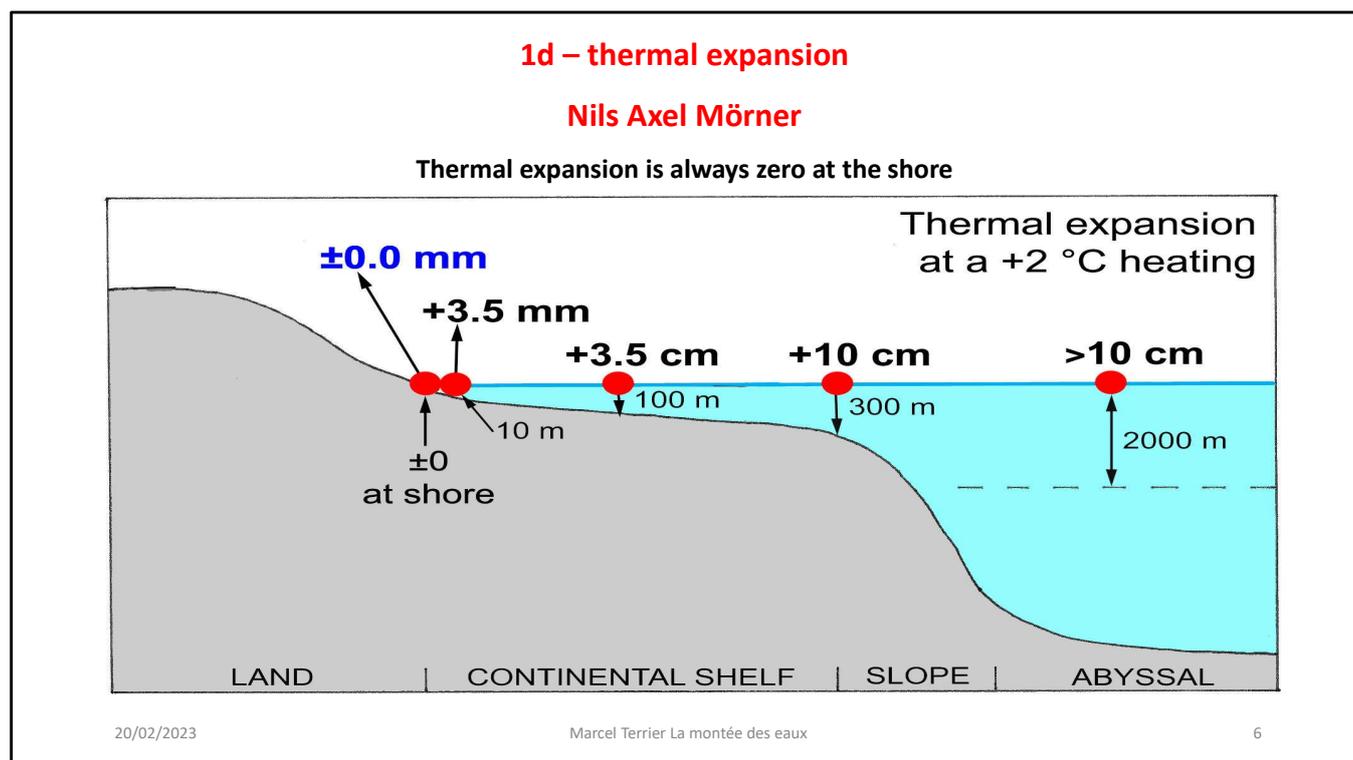
5

Après des éléments simples et évidents, voici tout de suite des complications!

La surface des océans est une surface mobile, très dynamique parcourues par des ondes de marée qui sont dues non seulement à la lune mais au soleil et à toutes les planètes du système solaire. Des chercheurs cherchent à définir les périodes, les emplacements, les hauteurs dues à chacune des causes.

Sur les zones côtières la mesure est continue et le passage des ondes bien visibles. Au cœur des océans seule la mesure par satellite est possible et ne se fait pas de façon continue ce qui crée des biais de mesure. Sur les côtes on mesure par rapport à la côte solide mais au milieu des océans qu'en est il?

Des bateaux vont au cœur des océans pour en mesurer les profondeurs et font un point GPS pour position et latitudes. Ils doivent retourner aux ports de référence les plus proches pour caler leurs mesures sinon ils n'atteignent pas la précision souhaitée!



Nils Axel Mörner est un paléo géophysicien et un Paléo géo dynamique reconnu par ses pairs comme le meilleur. Il est un des rares à avoir compris l'importance de la gravité dans la forme de la surface des océans. Si la température des eaux des océans change sans que change la masse totale, les lois de la gravité imposent que l'expansion thermique ne fasse monter les eaux qu'aux endroits les plus profonds car sur les rives peu profondes la gravité ne change pas, les masses continentales dominent et le peu d'eau présente ne modifie pas ni les gradients de gravité ni les équipotentiels.

Ce qui suit ignore les aspects dynamiques!

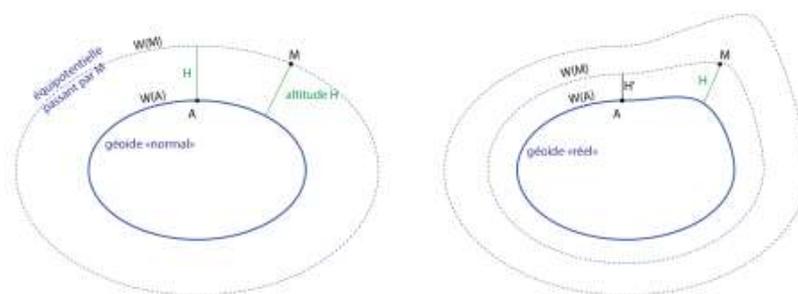
Ainsi l'équipotentielle locale sur les bords reste à la même position alors qu'au centre les eaux peuvent gonfler thermiquement en déplaçant l'équipotentielle de surface. L'équipotentielle change de forme, c'est tout! Un océan n'est pas un peu d'eau dans une cuvette!

Beaucoup d'études sur l'expansion thermique des océans calculent une dilatation verticale des eaux dans les parties d'océans de grande profondeur et étalent en surface cette augmentation de volume y compris sur les zones de faible profondeur et donc exagèrent les élévations sur les côtes. Mais ces mêmes études constatent que les variations stériques sont plus faibles sur les plateaux continentaux! C'est contradictoire!

2.4 Les altitudes

2.4.1 Quelques définitions

L'altitude est définie par l'Institut Géographique National français (IGN) comme "la coordonnée par laquelle on exprime l'écart vertical d'un point à une surface de référence proche du géoïde". L'altitude est donc une quantité physique liée à la pesanteur et à son potentiel, pas seulement une quantité géométrique. L'altitude a une implication pratique très importante : elle définit le sens d'écoulement d'un liquide, des hautes vers les basses altitudes. De fait, les surfaces d'altitude égale doivent être proches d'équipotentiels du champ de pesanteur.



20/02/2023

Marcel Terrier La montée des eaux

7

Source: Laboratoire de géologie de L'ENS.

La notion d'équipotentielle du champ de pesanteur est fondamentale car l'altitude est censée donner le sens d'écoulement des liquides. Au niveau mondial le géoïde donne le potentiel de gravité mesuré sur la surface. Plus ce potentiel est bas plus l'altitude est élevée. Quand on essaie de faire cohabiter des notions de surfaces géométriques, par exemple l'ellipsoïde moyen, avec la notion de surfaces équipotentiels de gravité on se trouve confronté à deux références différentes qui toute deux se déforment continument dans le temps et dans l'espace!

La Terre est évidemment hétérogène; elle présente notamment des variations latérales de densité qui peuvent être importantes. De fait, les surfaces équipotentielles du champ de pesanteur réel présentent des déviations notables par rapport à l'ellipsoïde de référence. La figure 2.9 montre graphiquement que les équipotentielles du champ réel "ondulent" – on parle effectivement des ondulations du géoïde – en remontant au-dessus d'anomalies de masse positives et en descendant au-dessus d'anomalies de masse négatives. On peut cependant toujours définir la surface équipotentielle la plus proche du niveau des mers, qui est le géoïde réel, ou le géoïde tout court. Les ondulations du géoïde (par rapport à l'ellipsoïde de référence) renseignent donc sur les distributions de densité à l'intérieur de la Terre.

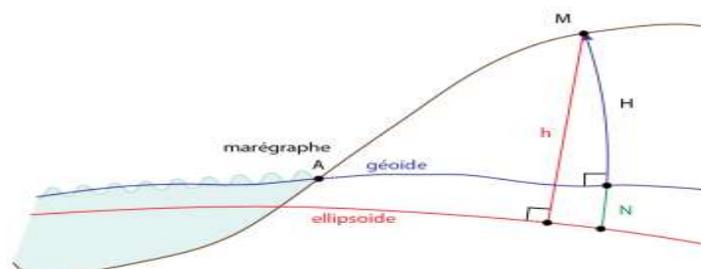


FIGURE 2.10 –

19

2.3. LE POTENTIEL DE PESANTEUR ET LE GÉOÏDE

20/02/2023

Marcel Terrier La montée des eaux

8

Source: Laboratoire de géologie de L'ENS.

L'ellipsoïde c'est la surface d'un ellipsoïde de régression par rapport à la surface réelle de la Terre, le géoïde est une surface plus cabossée qui tente de suivre les équipotentielles de gravité.

L'altitude réelle est donnée par H mais les GPS donnent souvent h donc quand vous êtes sur une plage vous pouvez voir votre GPS annoncée des altitudes négatives.

Le géoïde qui suit la pesanteur passe au dessus et en dessous du géoïde selon les lieux!

Les cartes elles, annoncent H.

La pesanteur à la surface de la Terre n'est pas la même partout, elle est notamment plus élevée aux pôles qu'à l'équateur (d'environ 0,5 %). Pour les besoins pratiques, la Conférence générale des poids et mesures a défini en 1901^{2,3} une valeur normale de l'accélération de la pesanteur terrestre, notée g_0 , égale à $9,806\ 65\ \text{m/s}^2$, soit approximativement $9,81\ \text{m/s}^2$ (ou $9,81\ \text{N/kg}$). Cette

valeur correspond à la pesanteur sur un [ellipsoïde idéal](#) approchant le [niveau de la mer](#) et à 45° de [latitude](#).

Pourquoi un géoïde et un ellipsoïde?

Toute mesure a besoin d'une référence. **Le géoïde étant une surface équipotentielle de pesanteur particulière, il sert de zéro de référence pour les mesures précises d'altitude.**

Les applications sont nombreuses : [hydrologie](#) (étude des [bassins versants](#)), [aéronautique](#), [balistique](#).

Dès lors que l'on a voulu envoyer des objets volumineux ([fusées spatiales](#), [missiles balistiques intercontinentaux](#)) suivant des trajectoires elliptiques autour de la Terre, il devenait important de connaître avec précision le champ de pesanteur terrestre. **Une méthode de prospection [géophysique](#), la [gravimétrie](#), utilise également le géoïde comme référence.**

Mais cette surface irrégulière est difficile à utiliser dans les calculs, et on préfère alors utiliser un [ellipsoïde](#), surface régulière qui lorsqu'elle est bien choisie (centre, dimensions, orientation...) s'écarte au maximum de quelques dizaines de mètres du géoïde, quel que soit le point considéré à la surface de la Terre (voir [système géodésique](#)). Cette erreur est visible sur certains appareils GPS : ceux-ci ne permettant que de mesurer la distance par rapport au centre de la Terre, les appareils utilisant l'approximation ellipsoïdale présentent une erreur dans leur calcul d'altitude.

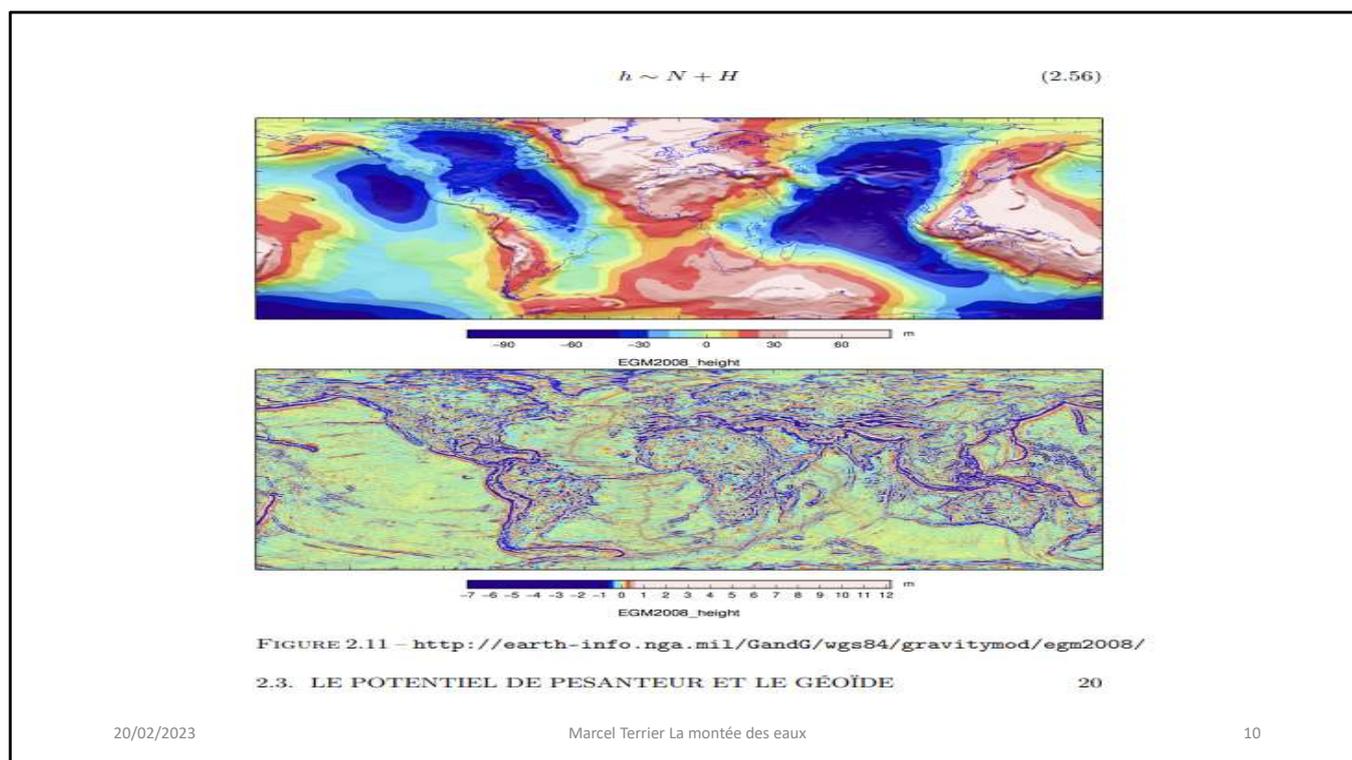
20/02/2023

Marcel Terrier La montée des eaux

9

La prospection géophysique, en particulier des fonds marins nécessite un calage précis des mesures en mer avec les références sur terre.

pour comprendre les observations à long terme changements du niveau de la mer, en particulier sur les côtes vulnérables, il devient essentiel de tenir compte à la fois du mouvement de la croûte et des changements du géoïde. En effet le géoïde réel se déforme en permanence.



Source: Laboratoire de géologie de L'ENS.

Au dessus les différences d'altitudes entre le géoïde, et là comme référence, l'ellipsoïde!
Grandes ondes en haut.

Les courtes longueurs d'onde du géoïde (figure 2.11, bas) reflètent les variations latérales de densité dans la lithosphère bord des côtes par exemple ou fosses marines. Les équipotentielles de gravité sont donc bien déformées sur les côtes.

On observe sur la figure 2.11 que la hauteur du géoïde grandes ondes varie de -110 m à +85 m. Il se trouve donc parfois en-dessous et parfois en-dessus de l'ellipsoïde de référence. De fait, on peut être au niveau de la mer – sur une plage par exemple – et lire sur son GPS une hauteur négative car le GPS donne la hauteur par rapport à l'ellipsoïde de référence, pas l'altitude ! Si l'on souhaite convertir la hauteur ellipsoïdale fournie par le GPS en une altitude, il faut alors connaître N puis appliquer la formule.

L'exemple du Mississippi est célèbre car selon les cartes sont altitudes à la source est inférieures à son altitude à son estuaire!

Lorsqu'ils examinent l'évolution du SSH dans le temps, les océanographes supposent généralement que le géoïde est constant et que seule la topographie dynamique change. Il s'agit généralement d'une bonne approximation pour des périodes de quelques années ou moins, mais les changements à long terme du géoïde finiront par devenir importants. La topographie dynamique est particulièrement précieuse car elle définit le courant géostrophique, qui domine l'écoulement océanique en dehors des couches limites de friction à des périodes supérieures à quelques jours

SSH sea surface height. Par rapport à l'ellipsoïde.

Tableau 2.1- Différentes densités des matériaux terrestres.

matériaux	densité	matériaux	densité
Densité moyenne de la Terre	5,5	Gabbros	2,7 à 3,3
Densité moyenne de la croûte continentale	2,67	Péridotite	3,1 à 3,4
Sédiments non consolidés	1,8 à 2,0	Charbon	1,2 à 1,8
Sables « secs »	1,4 à 1,65	Pétrole	0,6 à 0,9
Sables « humides »	1,9 à 2,05	Eau de mer	1,01 à 1,05
Grès	2,0 à 2,5	Glace	0,88 à 0,92
Sel	2,1 à 2,4	Chromite	4,5 à 4,8
Marnes	2,1 à 2,6	Pyrite	4,9 à 5,2
Calcaires	2,4 à 2,8	Hématite	5,0 à 5,2
Granites	2,5 à 2,7	Magnétite	5,1 à 5,3
Dolérite	2,5 à 3,1	Fer	7,3 à 7,8
Serpentine	2,5 à 2,6	Cuivre	8,8 à 8,9
Gneiss	2,65 à 2,75	Argent	10,1 à 11,1
Basaltes	2,7 à 3,1	Or	15,6 à 19,4

20/02/2023

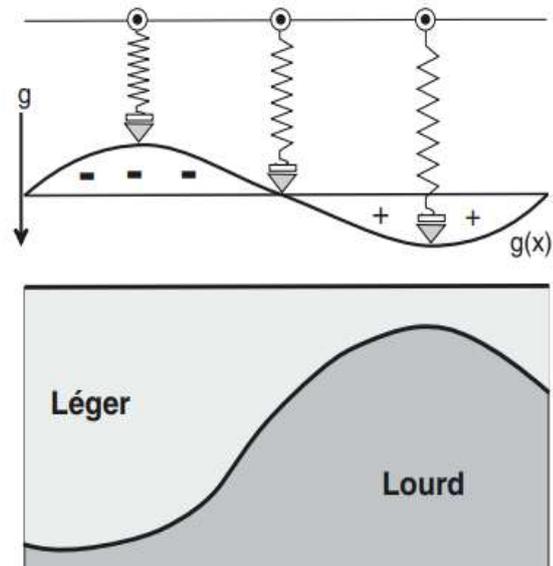
Marcel Terrier La montée des eaux

11

Jacques Dubois Michel Diament Jean-Pascal Cogné Cours et exercices corrigés

Il n'y a donc aucune raison pour que le géoïde et l'ellipsoïde soit confondus!

Figure 2.1- Les hétérogénéités dans le sous-sol sont sources de variations de la pesanteur.



20/02/2023

Marcel Terrier La montée des eaux

12

Jacques Dubois Michel Diament Jean-Pascal Cogné

L'accélération de la pesanteur

L'accélération de la pesanteur (généralement appelée simplement pesanteur) à la surface de la Terre est l'accélération que subit tout point massique de cette surface du fait de :

- l'attraction newtonienne de l'ensemble des masses de la Terre, qui crée l'accélération gravitationnelle encore appelée gravité,
- l'accélération centrifuge due à la rotation de la Terre.

20/02/2023

Marcel Terrier La montée des eaux

13

Jacques Dubois Michel Diament Jean-Pascal Cogné

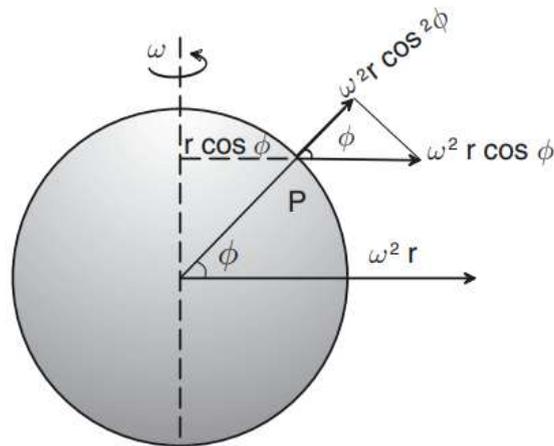
L'accélération de la pesanteur a deux causes mais la gravité n'en a qu'une!

Si la vitesse de rotation change, ce qui est le cas, à cause des liens entre moment cinétique des astres, l'accélération de la pesanteur change aussi!

Des courants apparaissent donc puisque qu'en conséquence les eaux se déplacent et les niveaux d'eau varient donc.

Si ω est la vitesse de rotation angulaire de la Terre, la composante radiale de l'accélération centrifuge en un point de la surface du globe situé à une latitude ϕ est $\omega^2 r \cos^2 \phi$ (fig. 2.2).

Figure 2.2 - Composantes de l'accélération centrifuge en un point P (latitude ϕ) sur la surface de la Terre (sphérique de rayon r) en rotation avec une vitesse angulaire ω .



20/02/2023

Marcel Terrier La montée des eaux

14

Jacques Dubois Michel Diament Jean-Pascal Cogné

Dans cet exemple la Terre est sphérique et l'influence de sa déformation sur l'accélération de la pesanteur locale n'est pas encore prise en compte.

Nous obtenons donc finalement l'expression de la pesanteur à la surface d'une Terre théorique considérée comme homogène et en rotation :

$$g = GM r^2 (1 - (3/2)(a^2/r^2) J_2(3\sin^2\phi - 1)) - \omega^2 r \cos^2\phi$$

On retrouve bien la somme de deux termes correspondant à l'accélération gravitationnelle et à l'accélération centrifuge.

Rappelons l'hypothèse de base que nous avons faite :

la densité dans la Terre ne varie que radialement. Il est donc probable que la valeur de la pesanteur vraie sera différente de celle calculée avec cette formule du fait des hétérogénéités de masse par rapport à ce modèle radial de densité.

20/02/2023

Marcel Terrier La montée des eaux

15

Jacques Dubois Michel Diament Jean-Pascal Cogné Géophysique 4e édition

L'ensemble des termes retranchés à 1 dans la parenthèse est une correction de forme qui tient compte de l'aplatissement aux pôles du à la déformation de rotation supposée constante.

Les termes dans la parenthèse tiennent compte du fait que la sphère ne reste pas une sphère. **Mais aucun terme ne prend encore en compte les variations dues aux variations de la rotation!**

La formule fait donc un calcul statique.

Quelques ordres de grandeur des déformations

	vertical	horizontal
Marée terrestre	30 cm	10 cm
Charge de marée océanique	10 cm	2 cm
Charge pression atmosphérique	1 cm	2 mm
Charge hydrologique	5 cm	1 cm
Rebond post-glaciaire	1 cm/an	2 mm/an
Tectonique	1 cm/an	1-10 cm/an
Mouvements du géocentre	4 mm	2 mm

3

Source : R. Biancale

20/02/2023

Marcel Terrier La montée des eaux

16

Les fluctuations verticales et horizontales de la croûte terrestre.

Ce sont des ordres de grandeur qui ne donnent aucun ordre de grandeur pour leurs variations dues aux variations de rotations.

Ces déformations ne militent pas en faveur d'une précision du mm pour la mesure du niveau des océans et ce, sans tenir compte de la confusion possible entre grandes ondes et tendances longs termes c'est-à-dire entre résultats statiques et résultats dynamiques!

Mesure des mouvements co-sismiques

→ le séisme du Maule (27 fév. 2010)

Exemples de changements brusques de coordonnées suite au séisme du Maule (Chili) de magnitude 8.8 le 27 février 2010:

➤ Ville de Concepcion (station laser)

→ déplacement: 65 cm S, 250 cm W, -10 cm vertical

➤ Ville de Santiago du Chili (station DORIS)

→ déplacement: 15 cm S, 26 cm W, -2 cm vertical



20/02/2023

Marcel Terrier La montée des eaux

Source: R. Biancale et IDS/CLS

17

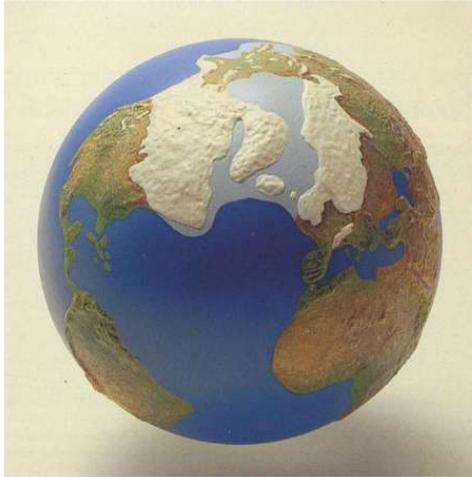
Les déformations de la Terre Leçon n° 2 La Terre et l'Environnement observés depuis l'espace Anny Cazenave

Un exemple de déplacement!

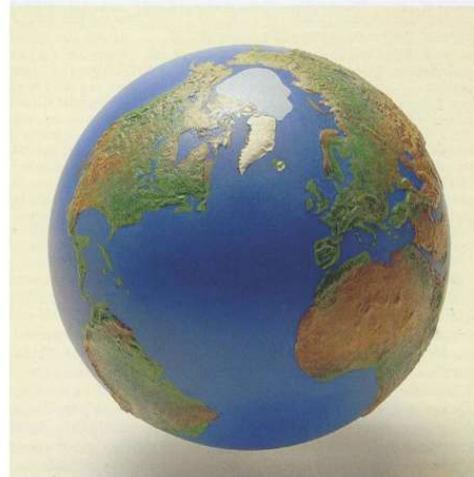
Des mesures de variations de niveau des océans peuvent ne pas être comprises si on ignore ce type d'évènements.

En dehors des tsunamis, après la rupture les eaux ne retrouvent pas leurs places.

Glaciation/Déglaciation et « rebond post-glaciaire »



Il y a 20 000 ans →
dernier maximum glaciaire



Aujourd'hui

20/02/2023

Marcel Terrier La montée des eaux

18

Source R. Biancale et IDSCLS Les déformations de la Terre Leçon n° 2 La Terre et l'Environnement observés depuis l'espace Anny Cazenave

Voici la cause de la montée des eaux commencée il y a 20000 ans!
Cette montée se poursuit aujourd'hui faiblement mais est-on capable de la mesurer compte tenu de ce qui précède?

La plasticité des roches fait que la disparition des surcharges aura encore des effets des milliers d'années après.

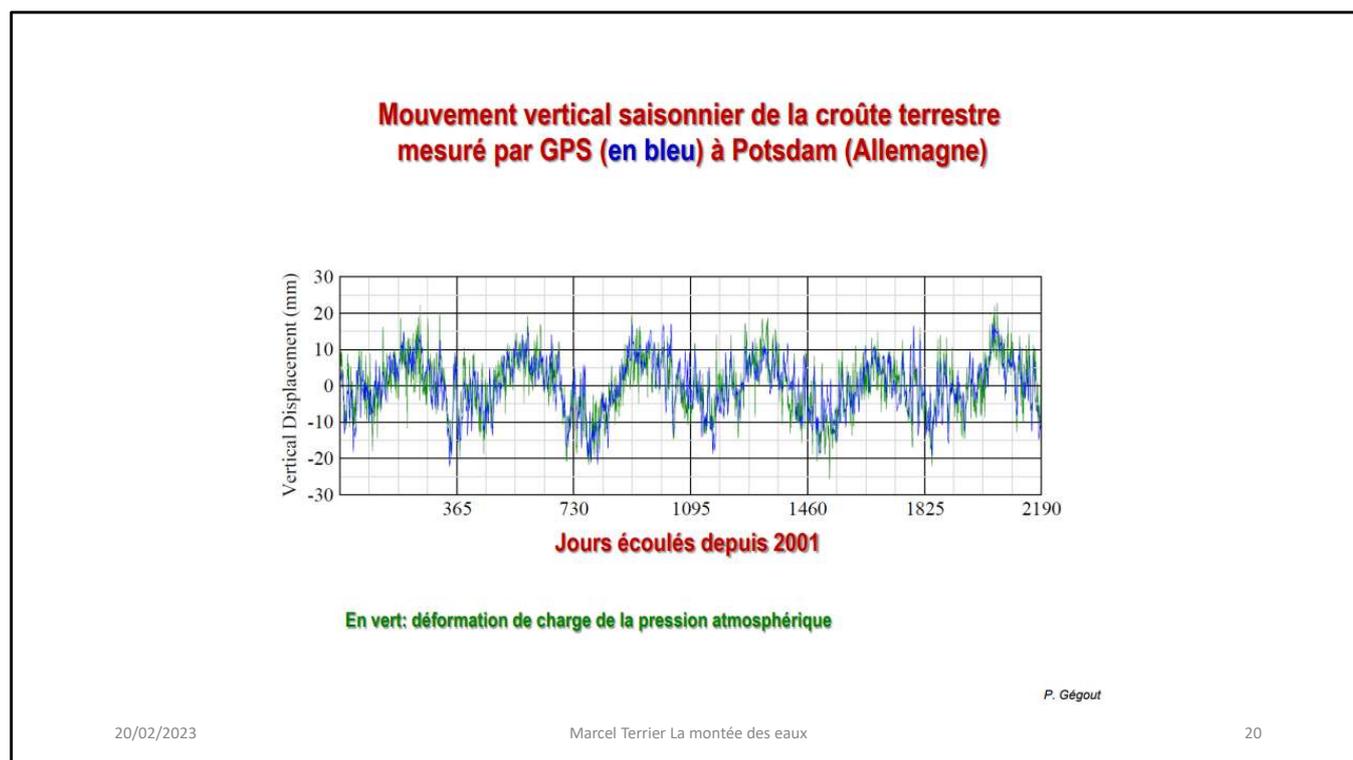
. Ainsi, les changements passés de la couverture de glace, en particulier au cours de la période glaciaire la plus récente qui a culminé il y a plus de 19 000 ans, sont toujours à l'origine des changements du niveau de la mer observés aujourd'hui. Cette réponse à long terme de la Terre est appelée **ajustement isostatique**

glaciaire (GIA)

Les évènements se succèdent ainsi: La couche de glace fond, L'eau a tendance à monter, mais simultanément la part élastique du comportement rhéologique des roches déchargées s'ajoute à l'effet de flottaison pour provoquer une remontée du sol, puis la part plastique du comportement rhéologique des roches provoque une redescente des roches et une apparente montée des eaux. C'est cette part qui est en œuvre aujourd'hui! (Pensez aux jeux avec une pâte spéciale qui mise en boule rebondit comme une balle de caoutchouc mais qui posée sur une table s'étale en flaque!).

cause du changement du niveau de la mer. De plus, comme nous le verrons plus loin, chacun des différents systèmes d'observation a ses limites. Ainsi, comme nous l'illustrons, la combinaison de techniques permet la compréhension la plus complète des causes de l'élévation globale du niveau de la mer et de sa variabilité spatiale.

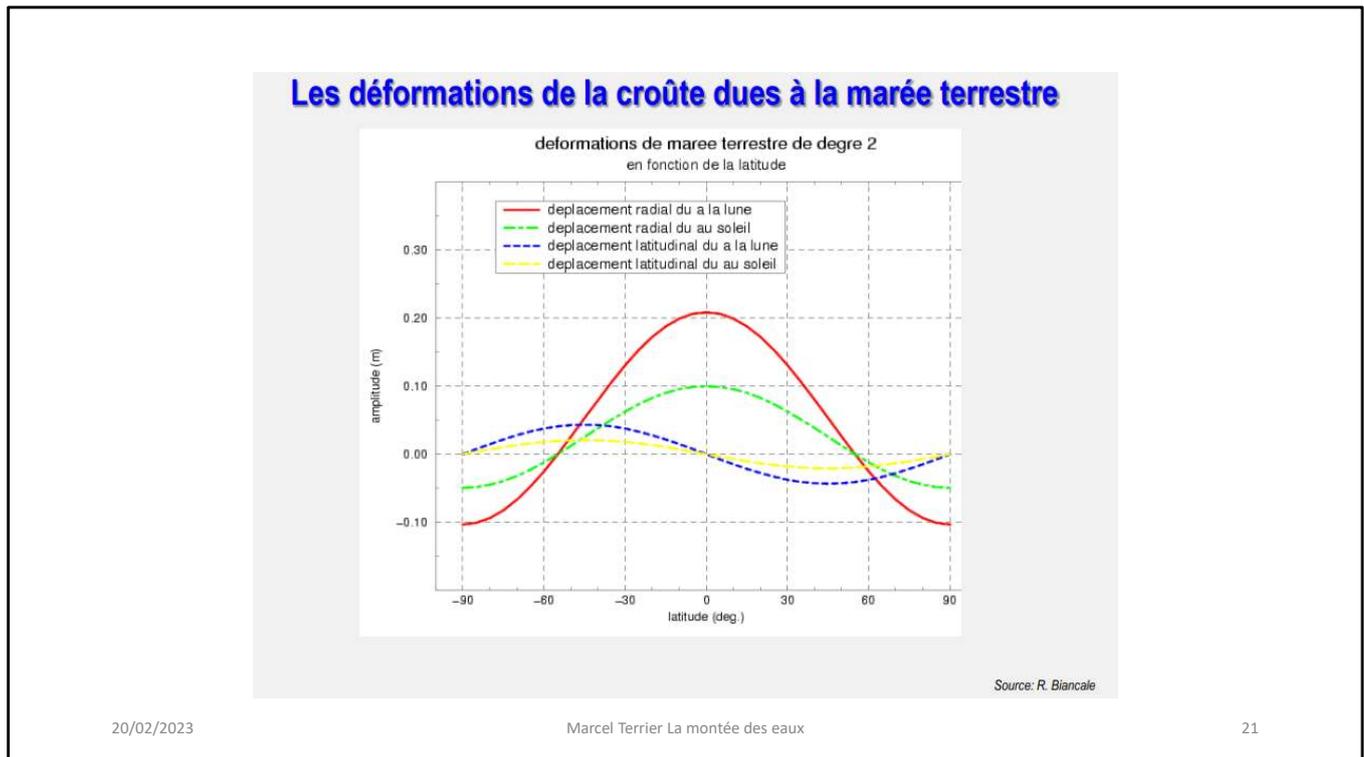
Le § qui précède tiré du texte de Anny Cazenave montre que cette dernière se montre très prudente.



Source P. Gégout. Rappelée par Nils Axel-Mörner et Les déformations de la Terre Leçon n° 2 La Terre et l'Environnement observés depuis l'espace Anny Cazenave

Un exemple de mouvements de la croûte terrestre!

Dus aux variations de pression atmosphériques!



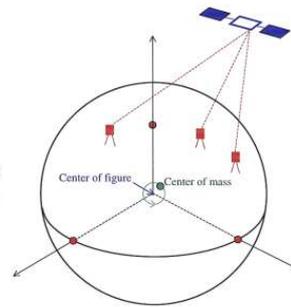
Source P. Biancale. Rappelée par Nils Axel-Mörner

Une partie des causes de variation où ne figurent pas les effets des planètes du système solaire!

Seules les positions relatives de la Terre avec la lune et de la Terre avec le soleil sont prises en compte.

Le système international de référence terrestre (International Reference Frame –ITRF–)

- Fixe par rapport à la Terre et tourne avec la Terre
- Origine : centre de figure de la Terre
- Axe z : dirigé vers le pôle moyen en 1900
- Axe x: intersection entre l'équateur et le méridien de Greenwich
- Il relie la Terre et le mouvement du satellite (calculé dans un repère inertiel centré au centre de masse de la Terre) via les mesures de poursuite
- Permet la détermination des **positions** et des **vitesse des stations géodésiques** ainsi que des paramètres de la **rotation terrestre** et du mouvement du **centre de masse de la Terre**



20/02/2023

Marcel Terrier La montée des eaux

22

Rappelée par Nils Axel-Mörner

La référence en question est donc est donc géométrique Mais tous les calculs sont rapportés au centre de masse qui se meut dans ce référentiel!

Ce schéma met bien en évidence une des différences entre géoïde et ellipsoïde le centre de masse se déplace dans la référence géométrique de l'ellipsoïde.

Pourquoi a-t-on besoin d'un système de référence?

- **Détermination précise des orbites des satellites:**
 - **GPS/GNSS (Global Navigation Satellite Systems)**
 - **Autres missions spatiales pour l'océanographie, la gravimétrie, etc.**
- **Applications en sciences de la Terre**
 - **Rotation de la Terre**
 - **Déformations du globe terrestre, tectonique, etc.**
 - **Etude du niveau de la mer**
 - ...
- **Autres applications**
 - **Navigation: Aviation, navigation terrestre et marine**
 - **Positionnement**

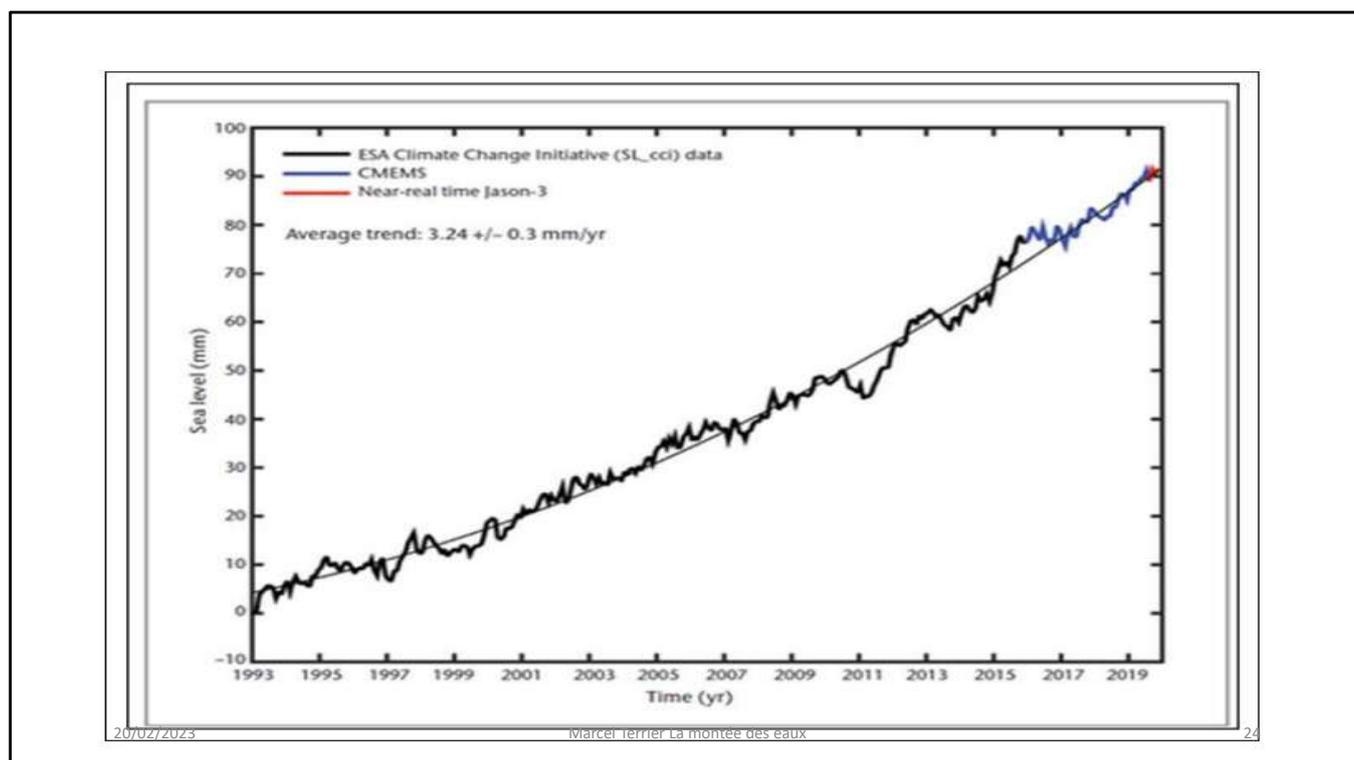
20/02/2023

Marcel Terrier La montée des eaux

23

Rappelée par Nils Axel-Mörner

Toute mesure d'altitude en un point et à quelque moment que se soit doit pouvoir être défini dans un système géoïde ou ellipsoïde et à tout moment les deux systèmes doivent être calés. Les bateaux retournent aux ports de références pour caler les mesures géodésiques faites en mer! (dérive des instruments entre autres)



Source: Elévation du niveau de la mer par observations satellitaires. Décryptage. Thierry Piou sociétaire du Club d'astronomie "Pêcheurs d'étoiles" La Baule

1 Elévation du niveau des mers. Analyse d'un graphique. Décryptage. Une première observation du graphique ci-dessous permet de faire plusieurs constats :

- La série satellitaire s'étend sur une durée de 27 ans.
- La tendance affichée (constante) ne correspond pas à la nature de la courbe d'approximation (non linéaire).
- Le graphique est la résultante de la concaténation de trois jeux de données distincts. Les deux premiers proviennent d'agences européennes et le dernier de la NOAA

Les deux premières remarques suffisent à disqualifier ce document, nous en verrons les raisons un peu plus loin, quant à la troisième remarque, s'il est théoriquement possible de concaténer plusieurs jeux de données provenant d'instrumentations différentes, il s'agit en pratique d'une opération bien délicate à réaliser, avec un cumul d'incertitudes difficiles à quantifier. La durée de vie limitée de l'instrumentation embarquée, ou du satellite lui-même, est certainement un inconvénient majeur des technologies spatiales

Les mesures sont bien faites au millimètre près mais peut on déclarer que ce sont des mesures de montées des eaux tant tout bouge en même temps?

La courbe représentée peut être une sinusoïde montante!

Observatoires	Etendue de mesures	Vitesse de l'élévation (mm/an)	Accélération de l'élévation ($\mu\text{m}/\text{an}^2$)
Brest (Atlantique)	1846-2018	$0,28 \leq v \leq 2,2$	$a \approx 11$
Saint-Nazaire (Atlantique)	1863-2018	$0,93 \leq v \leq 1,2$	$a \approx 1,8$
Newlyn (Atlantique)	1916-2018	$1,42 \leq v \leq 2,33$	$a \approx 9$
Hoek van Holland (Mer du nord)	1864-2018	$2,5 \geq v \geq 2,26$	$a \approx -1,6$
Den Helder (Mer du Nord)	1865-2018	$1,2 \leq v \leq 1,76$	$a \approx 3,6$
Delfzijl (Mer du Nord)	1865-2018	$0,64 \leq v \leq 2,78$	$a \approx 14$
Cuxhaven (Mer du nord)	1843-2016	$2,4 \geq v \geq 1,82$	$a \approx -3,4$
Esbjerg (Mer du Nord)	1882-2017	$0,54 \leq v \leq 1,97$	$a \approx 11,2$
Gedser (Mer Baltique)	1892-2017	$0,88 \leq v \leq 1,52$	$a \approx 5$
Warnemünde (Mer Baltique)	1856-2017	$0,68 \leq v \leq 1,87$	$a \approx 7,4$
Wismar (Mer Baltique)	1849-2017	$1,11 \leq v \leq 1,75$	$a \approx 3,8$
Marseille (Mer Méditerranée)	1885-2016	$1,6 \geq v \geq 1,05$	$a \approx -3,8$

20/02/2023

Marcel Terrier La montée des eaux

25

Source: Elévation du niveau de la mer par observations satellitaires. Décryptage. Thierry Piou sociétaire du Club d'astronomie "Pêcheurs d'étoiles" La Baule

Sur la diapo précédente on peut chercher à calculer les vitesses de montée des eaux et si on ne fait pas une droite de régression mais une approximation polynomiale on peut chercher l'accélération de cette montée.

On trouve des accélérations bien supérieures à celles données par les marégraphes ci-dessus de l'ordre de 117micromètre par année -2

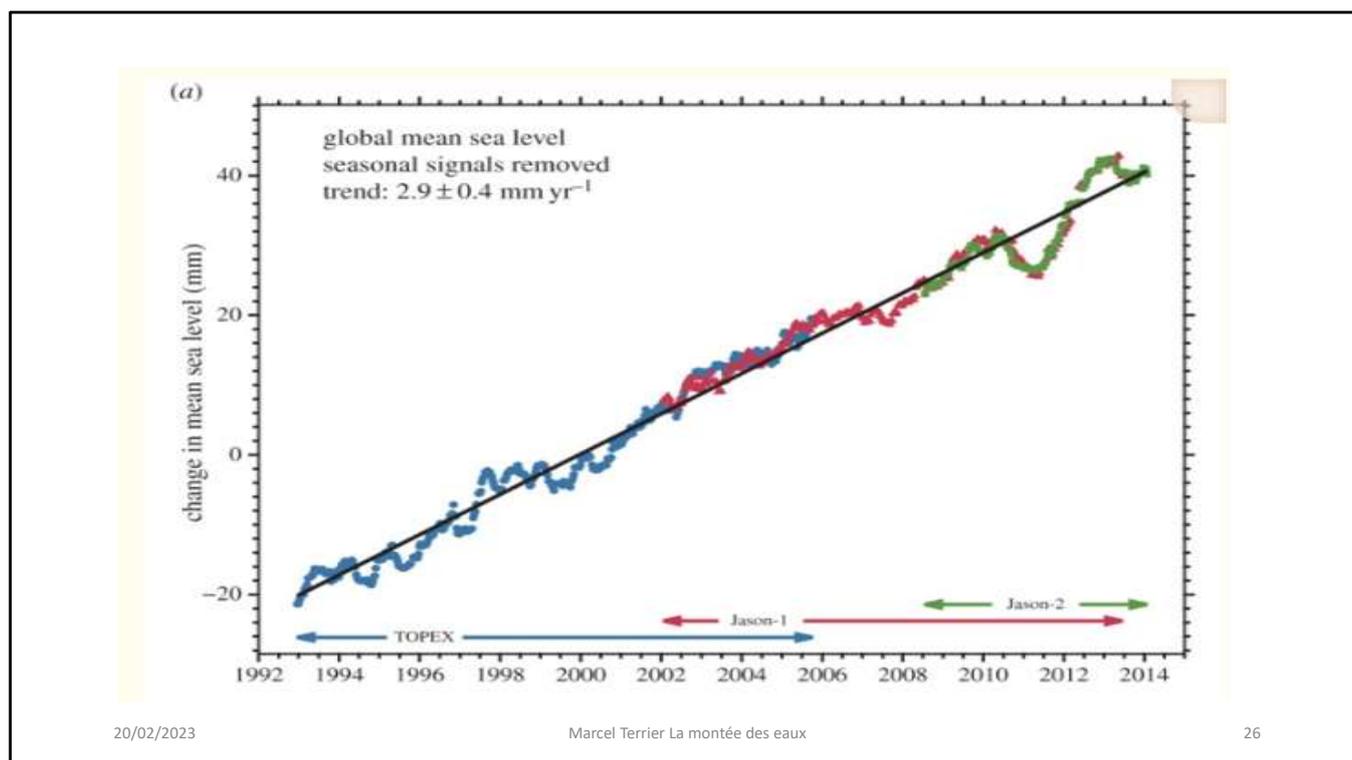
Cette courbe ne tient pas compte de la variation de la distance de la lune à la Terre.

Par exemple, les mesures instantanées des marégraphes ou de l'altimétrie ne sont au mieux qu'au centimètre près, mais la moyenne peut nous permettre d'obtenir de meilleures estimations. Cette affirmation n'est vraie que si aucune autre perturbation

n'intervient au cours des mesures qui serviront à l'établissement des moyennes. Est-ce vérifié?

Réponse, NON

L'effort de collecte des séries chronologiques du niveau moyen de la mer a été lancé lors de la conférence de 1933 de l'Union géodésique et géophysique internationale (UGGI). Le professeur finlandais Rolf Witting a suggéré de former un comité du niveau moyen de la mer pour collecter les données. Mais les marégraphes sont dans l'hémisphère nord et ne possèdent pas de série suffisamment longue et fiable encore aujourd'hui.



Niveau de la mer : mesurer les surfaces délimitées de l'océan

[Marc E. Tamisiea](#) , ¹ [Chris W. Hughes](#) , ^{1, 2} [Simon DP Williams](#) , ¹ et [Richard M. Bingley](#)

Mesures satellites.

Séries temporelles du changement moyen global du niveau de la mer à partir de l'altimétrie satellitaire (TOPEX/Poséidon, Jason-1 et Jason-2). A noter que cette série temporelle n'a pas été corrigée d'une

contribution due au GIA, estimée à - 0,3 mm par an et ne tient pas compte des différences entre zones profondes et zones de rivages.

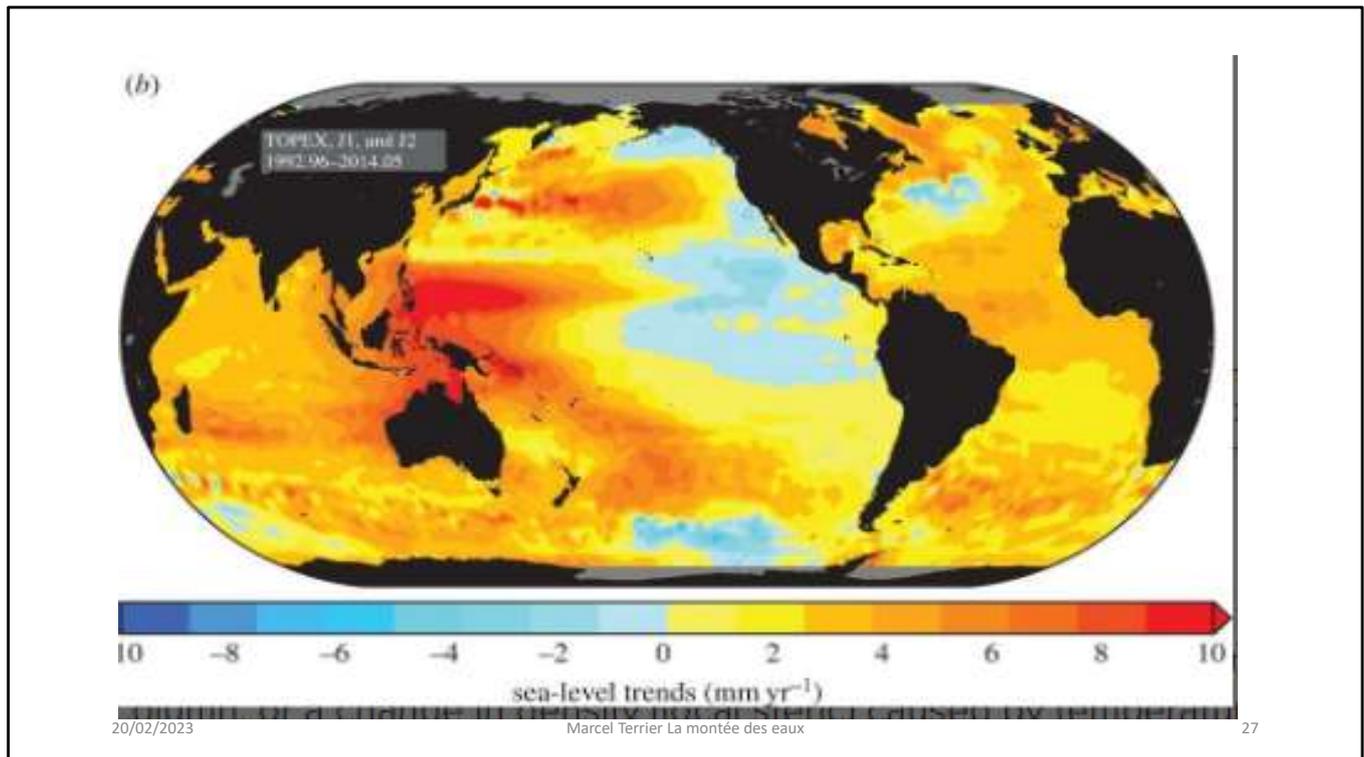
Les données altimétriques, notamment des missions satellitaires TOPEX/Poséidon, Jason-1 et Jason-2, ont fourni une couverture quasi-globale de l'évolution du SSH depuis le début des années 1990. La série temporelle de l'altimètre moyen mondial sur le niveau de la mer montre un taux de près de 3 mm par an, après prise en compte du changement GIA associé

. Cependant, au-delà de la simple tendance linéaire des données, il existe une importante variabilité

interannuelle. La carte mondiale des tendances de la surface de la mer sur **la période montre également de grandes variations spatiales par rapport à cette moyenne mondiale** . Les amplitudes et les schémas spatiaux de ces changements sont principalement déterminés par **des processus dynamiques**. Par exemple, l'augmentation notable de SSH de 1 cm par an dans le Pacifique occidental est principalement due à une intensification des alizés du Pacifique [[60](#)]. Cette augmentation régionale pourrait représenter un mode multidécennal dans l'océan . En effet, identifier et

supprimer les modes décennaux et multi décennaux , ainsi que les effets du vent et de la pression atmosphériques , des observations devient une pratique de plus en plus courante pour aider à identifier d'autres variabilités sous-jacentes, telles qu'une hausse à long terme.

Mais si on a une mesure précise, comme aucune des mesures locales ne se fait simultanément on ne peut pas prétendre avoir une photo des montées moyennes. Ces courbes sont des illusions, elles interrogent plus qu'elles ne renseignent. Les traitements numériques perturbent le résultat. Sur les côtes les valeurs sont les plus faibles.



Niveau de la mer : mesurer les surfaces délimitées de l'océan

[Marc E. Tamisiea](#) , ¹ [Chris W. Hughes](#) , ^{1, 2} [Simon DP Williams](#) , ¹ et [Richard M. Bingley](#)

L'augmentation donnée par les satellites au niveau des côtes n'est pas confirmée par les marégraphes et encore moins par les observations locales.

Le traitement infligé aux mesures directes perturbent les résultats.

Sur l'image rien ne garantit que les mesures représentées soient une image instantanée. Elle peut être une collection de chiffres sans rapport temporel tant la surface des océans se déforment continuellement.

Les discussions concernant le mouvement du géo-centre, et son impact sur les estimations du niveau de

la mer, aide à mettre en évidence l'une des incertitudes intrinsèques d'essayer d'obtenir le changement de volume océanique à partir de l'altimétrie. Le mouvement de la croûte sous l'océan, qui aura un impact sur l'estimation du volume de l'océan, reste libre. Et les discussions se poursuivent.

Cette contribution (négative) est fréquemment soustraite de l'observation altimétrique, augmentant le taux estimé, pour obtenir un changement de volume, comme dans la valeur rapportée ci-dessus. Cependant, tout autre processus entraînant une déformation de la croûte dans l'océan pourrait également être responsable de la contribution nette au-dessus de l'océan. Ainsi, il y aura toujours une certaine incertitude dans l'utilisation de l'estimation altimétrique comme mesure du changement de volume océanique.

Les efforts se poursuivent mais en ce moment, affirmer que ces courbes représentent bien l'élévation des eaux est prématuré.

Les forces de marées exercées par la Lune sur la Terre varient donc selon une période de 18,6 ans dont il faut tenir compte lorsque l'on cherche à évaluer l'élévation du niveau des océans. Il est alors nécessaire d'intégrer ce signal sur une durée égale au moins à cinq fois sa période, soit environ 100 ans dans ce cas précis, et bien entendu ceci est valable quel que soit la technologie utilisée, satellitaire ou marégraphique. Une telle durée permet aussi de filtrer les phénomènes chaotiques et aléatoires comme la houle et les variations de la pression atmosphérique (phénomène du baromètre inverse). Le tableau suivant regroupe les dates approximatives des prochains lunistices mineurs et majeurs. Ainsi, donnons-nous rendez-vous au plus tôt en 2100 afin d'analyser ces données satellitaires qui font, inutilement, couler beaucoup d'encre aujourd'hui.

Décembre 2020. Thierry Piou.

20/02/2023

Marcel Terrier La montée des eaux

28

C'est une des sources d'affirmation que la mer monte car une ville comme Saint Malo par exemple n'est inondée que si simultanément il y a une grande marée (Soleil Terre et Lune alignée) si la lune est au plus proche de la terre (Toutes les 18, 6 années) et si une forte dépression est présente. A chaque inondation le dérèglement climatique est invoqué alors que l'évènement ne se produit que rarement à cause des simultanités nécessaires.

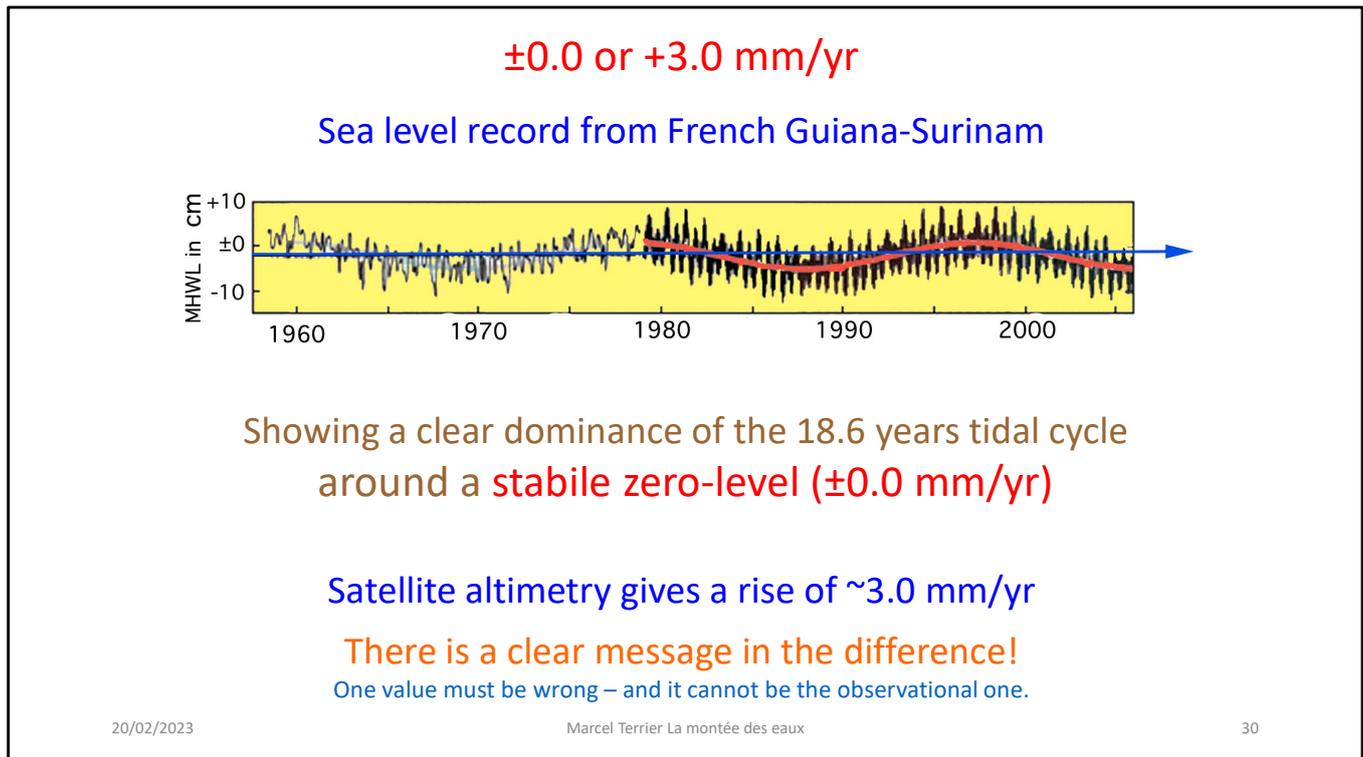
Le tableau suivant regroupe les dates approximatives des prochains lunistiques mineurs et majeurs

Lunistice majeur $\pm 28,4^\circ$	Lunistice mineur $\pm 18,4^\circ$
2006,6	2015,9
2025,2	2034,5
2043,8	2053,1
2062,4	2071,7
2081	2090,3

Ainsi, donnons-nous rendez-vous au plus tôt en 2100 afin d'analyser ces données satellitaires qui font, inutilement, couler beaucoup d'encre aujourd'hui.

Elévation du niveau de la mer par observations satellitaires. Décryptage. Thierry Piou sociétaire du Club d'astronomie "Pêcheurs d'étoiles" La Baule

En effet, mesurer le niveau des océans sans tenir compte du déplacement et des variations de hauteur des ondes de marées n'a pas de sens!



Nils Axel Mörrer: Les satellites se trompent!

La mesure satellite diffère du constat que la ligne moyenne donnée par les marégraphes ne bouge pas!

La différence ne viendrait-elle pas, entre autres, d'une sous estimation des incertitudes de mesures satellitaires?

In 1704
a water mark was cut into the bedrock
just east of Stockholm
at a level 356 cm above mean sea level

Today
(levelled in 1994)
the water mark lies 5.0 m
above present mean sea level

The uplifts rate is 4.9 mm/yr
in 290 year giving an uplift of 142 cm

This implies that eustatic sea level in 1704
was almost exactly where it is today
at about ± 0.0 cm

20/02/2023

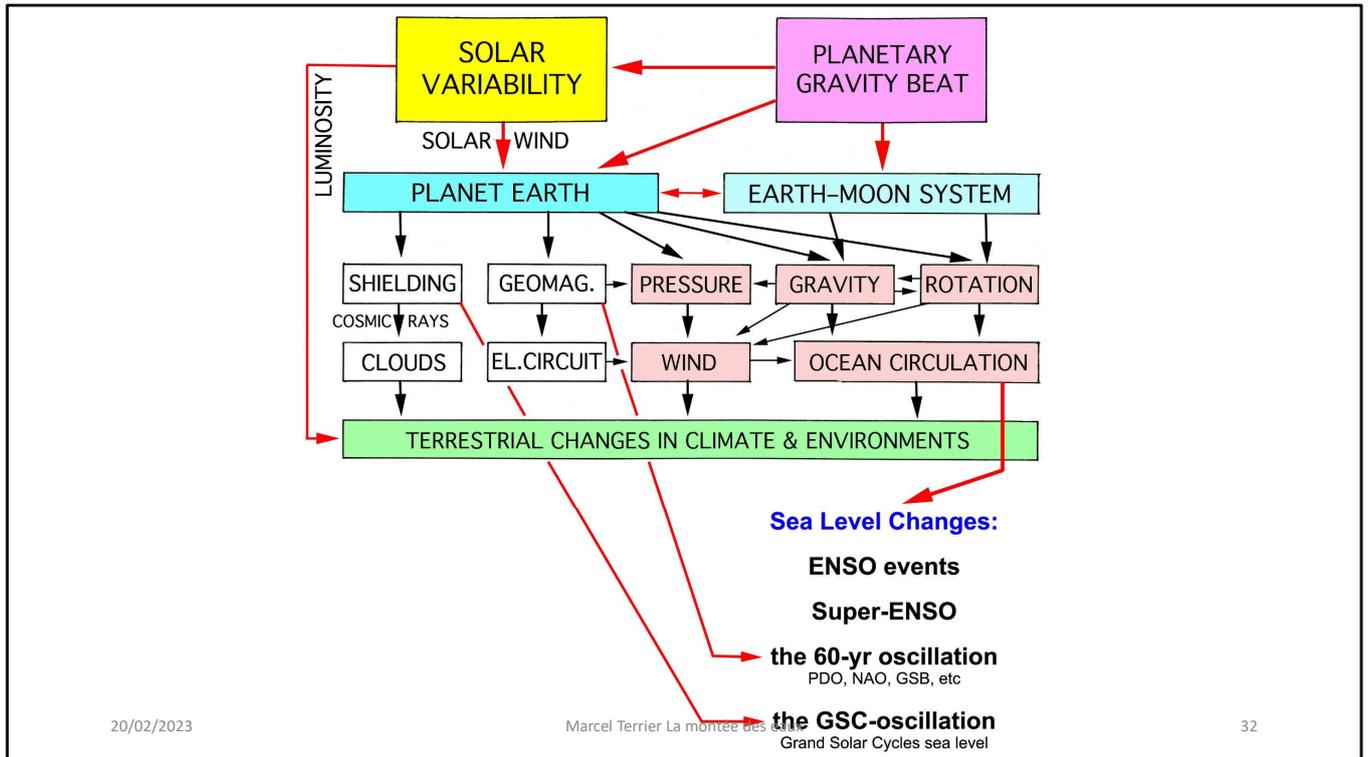
Marcel Terrier La montée des eaux

31

Nils Axel Mörner: Les satellites se trompent!

C'est la preuve que l'on est en présence d'évènements cycliques sans rapports avec le climat et l'activité humaine.

356+142=498 pas loin de 500! C'est la côte qui remonte par rapport à la surface de l'océan peut on en déduire qu'en conséquence le niveau des océans par rapport au fond des océans n'a pas changé?

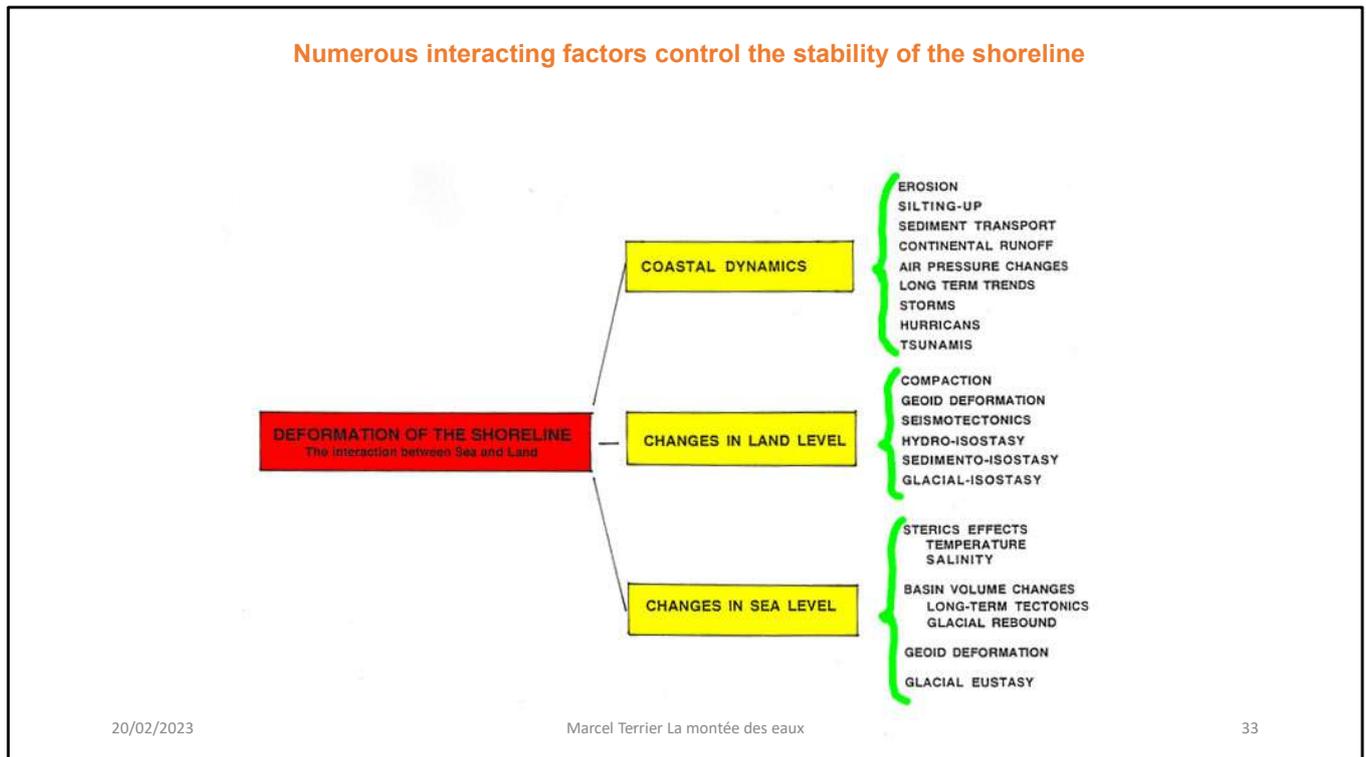


Nils Axel Mörrer

La complexité des causes de variations de niveaux!

On a le choix des causes, pas besoin de recourir aux effets humains.

La montée des eaux, les constats simples,
les mesures complexes, les résultats
controversés



Nils Axel Mörrer

Ce qui compte c'est ce qui se passe sur les côtes!

D'autres causes, encore, les modifient sans intervention humaine.

Eustasie rotationnelle telle qu'observée dans la nature[Nils-Axel Mörner](#)[Paléogéophysique et géodynamique, Stockholm, Suède](#) .**DOI:** [10.4236/ijg.2019.107042](https://doi.org/10.4236/ijg.2019.107042) [PDF](#) [HTML](#) [XML](#) **445** Téléchargements **935** Vues [Citation](#)[S](#)**Extrait**

Des faits d'observation des Maldives, de Goa et du Bangladesh dans l'océan Indien et des Fidji et de la Nouvelle-Calédonie dans le Pacifique enregistrent un niveau de la mer élevé au 17ème siècle, un niveau de la mer bas au 18ème siècle, un niveau de la mer élevé au début du 19ème siècle et un niveau de la mer stable au cours des 50 à 70 dernières années. Cela ne peut pas être compris en termes d'eustasie glaciaire (ou en termes d'effets stériques ou de tectonique), uniquement en termes d'eustasie rotationnelle. Le présent article donne un résumé des faits d'observation derrière la formulation du nouveau concept d'eustasie rotationnelle. Il révèle une tendance commune des changements du niveau de la mer, qui s'oppose aux changements du niveau de la mer dans l'hémisphère nord, et aux changements climatiques globaux en général. L'eustasie rotationnelle offre une explication logique.

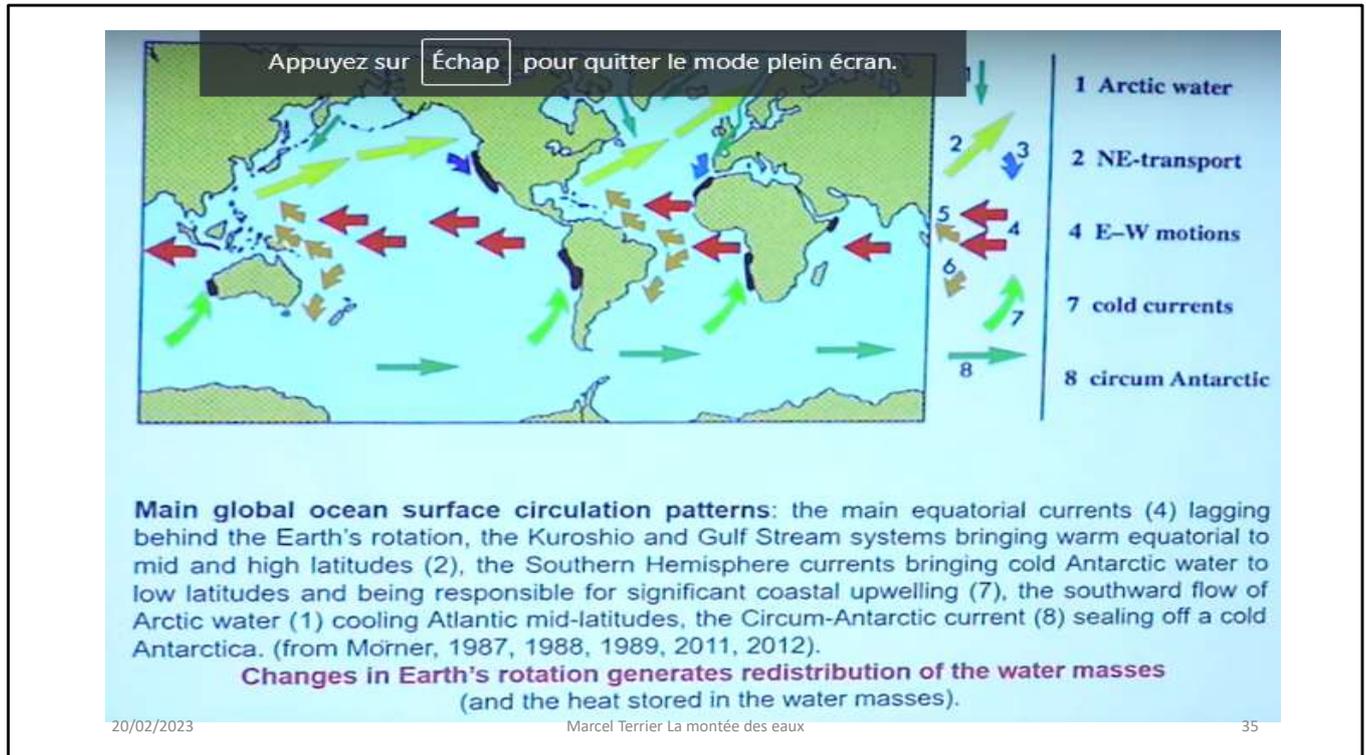
20/02/2023

Marcel Terrier La montée des eaux

34

Nils Axel Mörner

Dans toutes les zones pour lesquelles les climato-catastrophistes annoncent des submersions on ne constate rien de tel et les hauteurs d'eau y varient indépendamment des activités humaines.



Nils Axel Mörner

Les changements de rotation de la terre entraînent une redistribution des masses d'eau sans changements de volumes. (On a représenté ici un seul sens mais périodiquement le sens s'inverse!)

Les causes de changements sont nombreuses puisque tous les corps du système solaire s'influencent les uns les autres avec leurs vitesses et leurs moments cinétiques divers!

Les transmissions de moment cinétique entre toutes les planètes, le soleil, la Terre modifient les vitesses de rotations suffisamment pour créer les variations citées ici. Certains des cycles peuvent être longs (175 ans) et donner l'illusion de tendance lors des observations courtes.

9. Conclusion

Les faits d'observation mis en évidence documentent la séquence suivante d'événements enregistrés par plusieurs enregistrements dans l'océan Indien et le Pacifique :

- 1) Un niveau de la mer de +60 - 70 cm d'altitude de la fin du XVIe au XVIIe siècle, bien enregistré et daté aux Maldives, à Goa, aux Fidji et en Nouvelle-Calédonie.
- 2) Un niveau bas de la mer (bien en dessous de l'actuel) au 18ème siècle, bien enregistré et daté aux Maldives, à Goa, au Bangladesh et aux Fidji.
- 3) Un niveau de la mer de +30 cm au début du 19e siècle, bien enregistré aux Maldives, à Goa et aux Fidji (également observé sur l'île d'Ouvéa).
- 4) Un niveau de la mer stable de 10 à 20 cm au-dessus du niveau actuel à la fin du 19e et au début du 20e siècle, bien enregistré aux Maldives, à Goa, au Bangladesh, aux Fidji et en Nouvelle-Calédonie.
- 5) Une baisse du niveau de la mer de 10 à 20 cm en 1950-1970, bien enregistrée aux Maldives, à Goa, au Bangladesh, aux Fidji et en Nouvelle-Calédonie
- 6) Conditions stables du niveau de la mer au cours des 20 à 60 dernières années, telles que documentées aux Maldives, à Goa, au Bangladesh, aux Fidji, en Nouvelle-Calédonie et dans un certain nombre d'autres sites (par exemple, Minicoy, l'île Saint-Paul et le Qatar dans l'océan Indien, et Tuvalu, Vanuatu, Kiribati et Samoa dans le Pacifique).

Les enregistrements du niveau de la mer sont si similaires qu'ils peuvent être combinés en une courbe commune du niveau de la mer des 500 dernières années ([Figure 18 \(A\)](#)) valable pour les régions équatoriales de l'océan Indien et du Pacifique. Cette courbe est totalement différente de celle obtenue pour les zones d'essais eustatiques du nord-ouest de l'Europe ([Figure 18 \(B\)](#)). Cela ne peut être compris qu'en termes d'eustasie rotationnelle

Nils Axel Möerner

Donc on ne voit pas sur les côtes de variations de niveau qui seraient dues aux effets stériques engendrés par les variations de température!

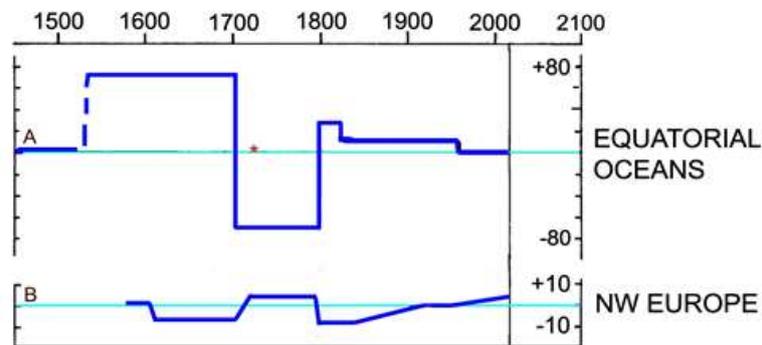


Illustration 18 . (A) la courbe eustatique combinée des régions équatoriales (en dessous de 30° N.Lat.) pour les 500 dernières années, et (B) la courbe eustatique des zones d'essai eustatiques européennes du nord-ouest de la Baltique, du Kattegatt et de la mer du Nord . Alors que la courbe B suit assez bien les changements climatiques généraux et semble donc dominée par l'eustasie glaciaire, la courbe A est en mode opposé et a des oscillations d'amplitudes beaucoup plus élevées, indiquant qu'elle est dominée par d'autres fonctions de forçage, à savoir. eustasie rotationnelle [1] .

20/02/2023

Marcel Terrier La montée des eaux

37

Nils Axel Mörner

Sur une période de presque 200 ans ces variations peuvent être prises à tort pour des tendances.

Les variations de rotations expliquent les écarts, pas besoin de recourir à des explications par les températures!

Niveau marin et déformation de la Terre :

Echelles spatio-temporelles Emilie Ostanciaux

To cite this version: Emilie Ostanciaux. Niveau marin et déformation de la Terre : Echelles spatio-temporelles. Stratigraphie. Université Rennes 1, 2012. Français. ffNNT : ff. fftel-00835605f

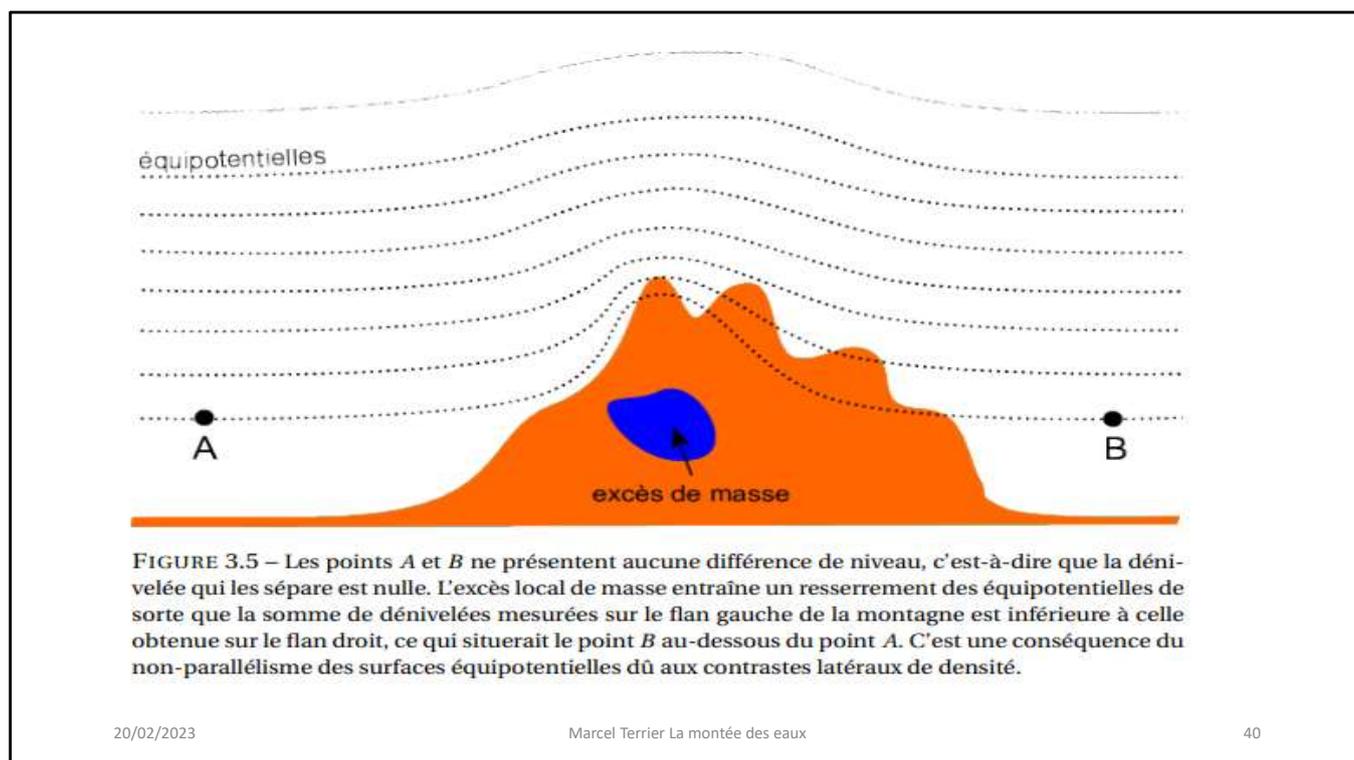
Processus	Amplitudes (m)		Longueur d'onde (km)		Temps (années)	Méthode d'observation/quantification	Source d'incertitudes	Références
	Niveau marin eustatique	Niveau marin relatif	Globale	Locale				
Tectono-eustatisme (âge moyen de la lithosphère et/ou dynamique des dorsales)	+/- 100 à 150	//		/	> 10 ⁶	Anomalies magnétiques /Stratigraphie/modélisation	Subduction du plancher océanique passé	(1) (2)
Plateaux océaniques	+/- 60 à 100	//		/	> 10 ⁶	Observation et datations des plateaux océaniques existant	Subduction des plateaux passés	(3) (2)
Climat: Glacio-eustatisme	+/- 100	//		/	< 10 ⁵	Récifs corraliens/Delta ¹⁸ O	Datations Diagenèse Reconstruction de l'histoire glaciaire	(4) (5) (6)
Climat: Dilatation thermique	< +/-10	//		/	< 10 ⁵	Mesures des propriétés stériques des eaux océaniques (actuelles)	Précisions et couverture géographique des mesures	(5) (7)
Climat: Glacio-hydro-isostasie	-1 à -2	< 1 000		> 1 000	< 10 ⁵	GPS/Altimètres-Marégraphes/modélisation	Structure rhéologique Reconstruction de l'histoire	(8) (15)
Topographie-dynamique	+ 80	< 2 000		> 1 000	> 10 ⁶	Stratigraphie/modélisation	Structure rhéologique Reconstruction du mouvement et vitesses des plaques Peu d'observation	(9) (10)
Géoiide	/	+/- 100	/	> 1 000	> 10 ⁶	Gravimètres	Précision des instruments	(11) (12)
Divagation polaire	/	< +/- 100	/	> 1 000	> 10 ⁶	Reconstruction à partir des anomalies magnétiques et mouvement des plaques dans le référentiel des points chauds	Reconstruction du mouvement des plaques Structure rhéologique	(13) (14)
Sédimentation	< +/- 60	//		/	> 10 ⁶	Epaisseur actuelle des sédiments	Estimation du volume de sédiment	(2) (7)
Orogénèse	< +/- 10	//		/	> 10 ⁶	Reconstruction de la surface océanique ou continentale en fonction des collisions	Estimation du raccourcissement	(7)

20/02/2023

Marcel Terrier La montée des eaux

39

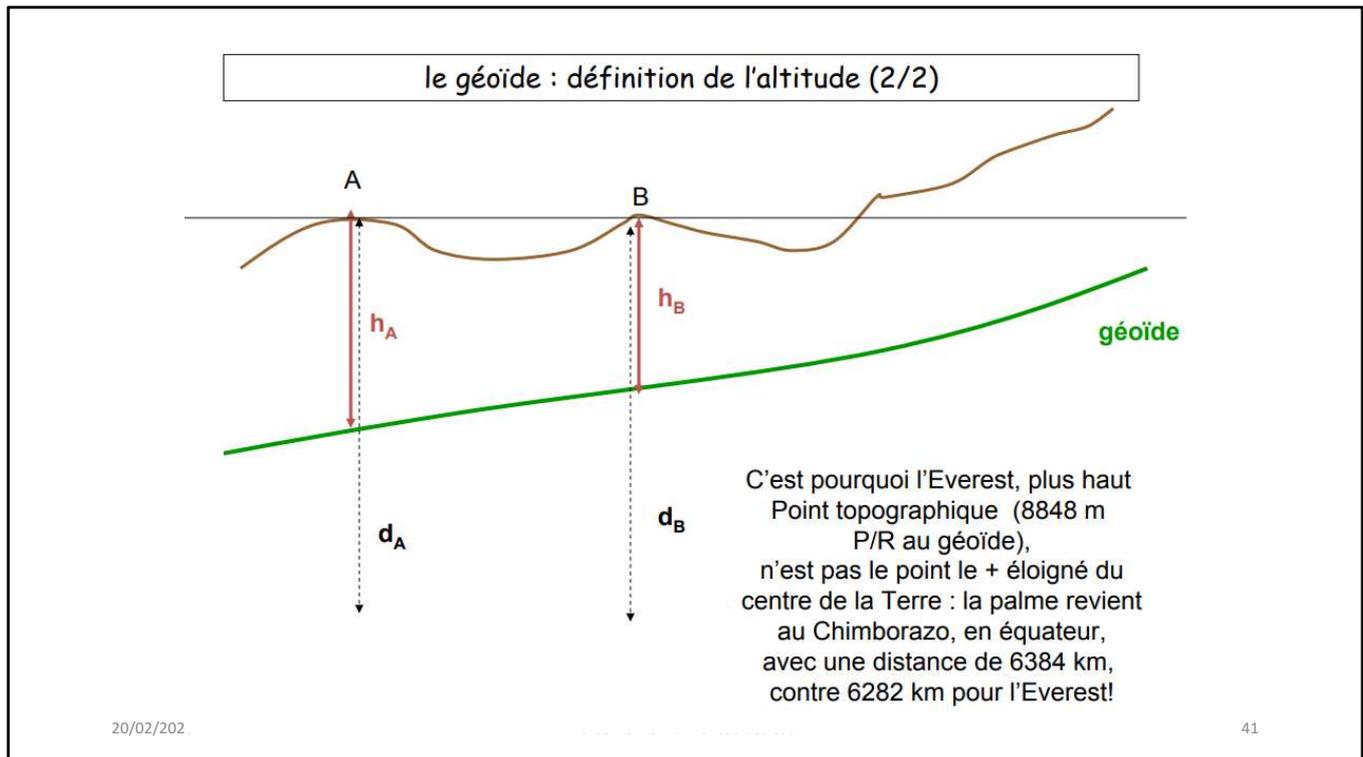
Chaque processus a un impact sur le niveau eustatique (Par rapport au fond des océans) ou au niveau relatif (Par rapport aux côtes)



La gravimétrie mobile en champ proche : outil essentiel pour la haute résolution en géodésie physique et en géosciences Jérôme Verdun 2017

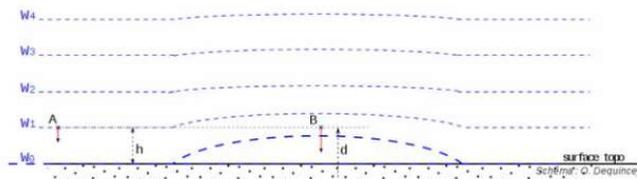
On peut constater le resserrement des équipotentielles au bord d'une falaise. Imaginons que le point A soit à la surface d'un océan au pied de cette falaise. L'équipotentielle passant par A suit la surface de l'océan, l'eau semble grimper sur la falaise mais par définition cette surface est l'altitude Zéro! Si la température de l'eau augmente le volume dilaté va se répartir entre l'équipotentielle au point A et l'équipotentielle située au-dessus. Comme on peut le constater, sur cette figure de Jérôme Verdun, le volume disponible au centre des océans entre deux équipotentielles est énorme. La nouvelle surface des océans se situera entre les deux équipotentielles et l'eau montera beaucoup plus au centre que près des côtes!.

Dans toutes les zones où le géoïde se déforme, la densité des équipotentielles de gravité change. La dilatation des eaux se glisse entre ses équipotentielles ce qui fait que le changement relatif de niveau entre la surface des océans et la croûte terrestre est plus fort là où les équipotentielles sont moins denses c'est-à-dire au cœur des océans!



Cours Préparation au CAPES Université Pierre & Marie Curie Par Mathieu RODRIGUEZ
rodriguez@geologie.ens.fr Pr. Agrégé en sciences naturelles & doctorant iSTeP-ens

Effet d'une perturbation locale de masse sur la pesanteur et le potentiel de pesanteur (1)



Effet d'un excès de masse E, à altitude topographique donnée

$$y(B) = \frac{GM}{r^2} + \frac{GE}{d^2} = y(A) + \frac{GE}{d^2}$$

comme $E > 0$, on a $y(B) > y(A)$

$$W(B) = -\frac{GM}{r} - \frac{GE}{d} = W(A) - \frac{GE}{d}$$

comme $E > 0$, on a $W(B) < W(A)$

- Un excès de masse induit, à altitude constante, une pesanteur plus grande, et un potentiel plus faible (« équipotentielle soulevée »).
- A l'approche de l'excès de masse, la pesanteur est déviée de sa verticale.

À même altitude topographique, la pesanteur est plus forte à l'aplomb d'un excès de masse :

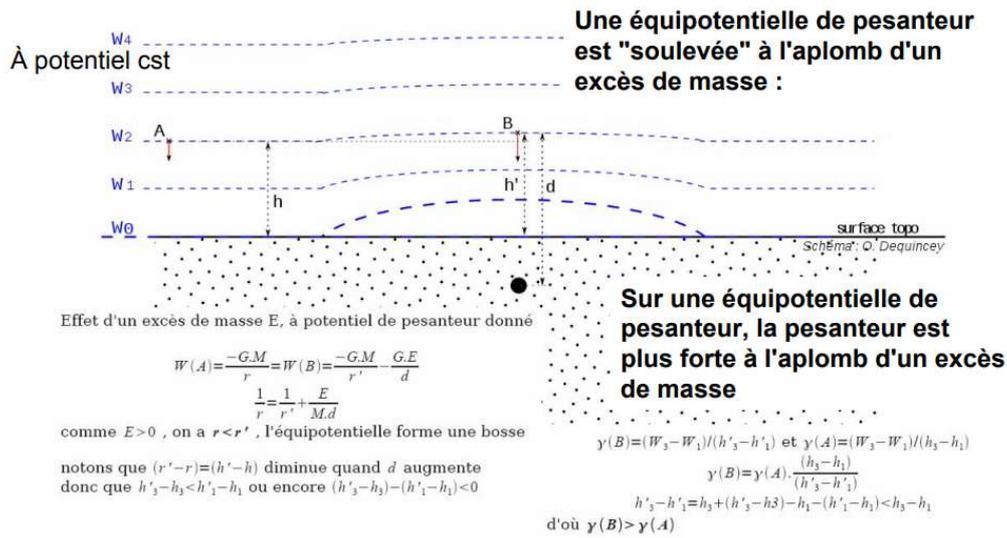
À même altitude topographique, le potentiel de pesanteur est plus faible à l'aplomb d'un excès de masse :

Une équipotentielle de pesanteur est "soulevée" à l'aplomb d'un excès de masse :

Cours Préparation au CAPES Université Pierre & Marie Curie Par Mathieu RODRIGUEZ rodriguez@geologie.ens.fr Pr. Agrégé en sciences naturelles & doctorant IStEP-ens

L'altitude ici est l'altitude topographique par rapport à l'ellipsoïde!

Effet d'une perturbation locale de masse sur la pesanteur et le potentiel de pesanteur (2)

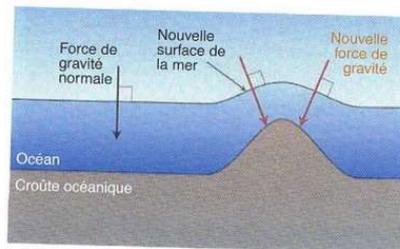


20/02/20.

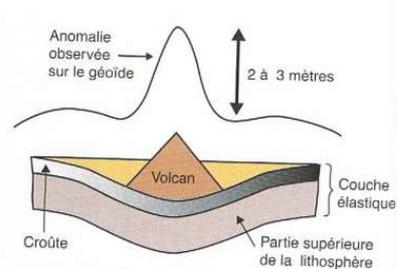
43

Cours Préparation au CAPES Université Pierre & Marie Curie Par Mathieu RODRIGUEZ
 rodriguez@geologie.ens.fr Pr. Agrégé en sciences naturelles & doctorant IStEP-ens

La flexure de la lithosphère : volcans de point chaud, zones de subduction.



L'altimétrie permet de cartographier les ondulations de la surface de la mer. Au dessus d'un volcan sous-marin, la surface de la mer se bombe. Au-dessus d'une fosse, elle se creuse. Elle épouse donc exactement la forme des reliefs sous-marins. Quelle en est la raison? La surface de la mer suit une figure d'équilibre telle que l'énergie potentielle de gravitation est partout la même (on parle de surface équipotentielle). Les lois de la physique indiquent en effet que la surface d'un fluide placé dans un champ de gravitation est une surface d'équilibre, partout normale à la direction locale de la gravité et sur laquelle l'énergie potentielle de gravitation est constante. La présence d'une montagne sous-marine crée localement un excès de gravité. Afin qu'à la surface de l'océan, l'énergie



potentielle reste constante, l'excès de gravité est compensé par un accroissement de la distance qui sépare la montagne de la surface marine, d'où un bombement de cette dernière (voir le schéma ci-dessus, à gauche). Le raisonnement inverse s'applique à une fosse sous-marine, qui correspond à un déficit de masse. On voit donc que la mesure de l'amplitude des creux et bosses de la surface marine permet de déterminer les reliefs sous-marins. Mais pour calculer avec précision l'altitude des reliefs, il faut aussi tenir compte de la déformation de la plaque océanique sous la charge du relief (schéma ci-dessus, à droite). Pour cela, on utilise des modèles du comportement mécanique de la lithosphère, qui eux-mêmes dépendent de l'âge de la croûte océanique.

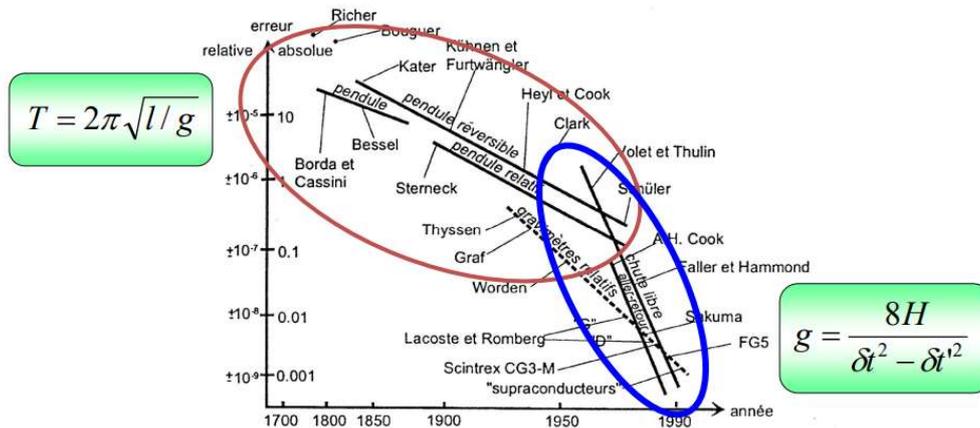
20/02/2023

44

Cours Préparation au CAPES Université Pierre & Marie Curie Par Mathieu RODRIGUEZ rodriguez@geologie.ens.fr Pr. Agrégé en sciences naturelles & doctorant IStEP-ens

Dans toutes les zones où le géoïde se déforme, la densité des équipotentielles de gravité change. La dilatation des eaux se glisse entre ses équipotentielles ce qui fait que le changement relatif de niveau entre la surface des océans et la croûte terrestre est plus fort là où les équipotentielles sont moins denses c'est-à-dire au cœur des océans!

Mesures gravimétriques



$$T = 2\pi\sqrt{l/g}$$

$$g = \frac{8H}{\delta t^2 - \delta t'^2}$$

Cours Préparation au CAPES Université Pierre & Marie Curie Par Mathieu RODRIGUEZ rodriguez@geologie.ens.fr Pr. Agrégé en sciences naturelles & doctorant IStEP-ens

Les mesures absolues (gravimètres ballistiques)

□ Principe

Principe simple : Basé sur la chute libre d'un corps dans le vide

On mesure la distance et le temps de chute et on résout l'équation de mouvement:

$$x = x_0 + v_0 \tilde{t}_i + \frac{g_0 \tilde{t}_i^2}{2}$$

Problème : champ de pesanteur terrestre : en 1 sec, l'objet chute de 5 m !

- mesures très précises de distance et de temps pour des dispositifs de mesure viables
- interférométrie laser / horloges atomiques

Dispositifs développés avec catapultage de l'objet vers le haut (Volet et Sakuma: Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) ou chute libre simple (Faller, Zumberge, Niebauer)

1950 : Volet : gravimètre utilisant un corps catapulté vers le haut. On mesure alors les temps de passage à deux niveaux à la montée et à la descente (précision 10^{-6}).

1963 – 1996 : Sakuma : amélioration de l'instrumentation (jusqu'à 10^{-9} (**1 μ Gal**))

1967 : Faller & Dicke : accuracy of 10^{-5} (**1 mGal**)

1972 : Hammond & Faller : laser light fringes; accuracy of 10^{-6} (**100 μ Gal**)

1980 : Zumberge & Faller/Sakuma; accuracy of 10^{-8} (**10 μ Gal**)

1985 : Niebauer & Faller : accuracy of **5 μ Gal**; 10 μ Gal (field conditions) → « JILAg »

1993 : Niebauer : FG5 accuracy of 10^{-9} (**1 μ Gal**)

20/02/20

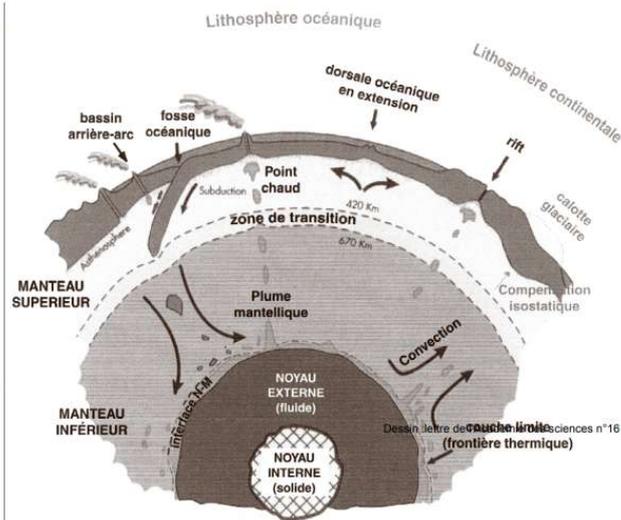
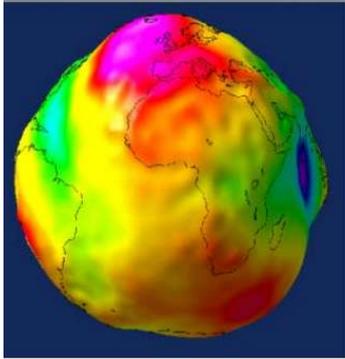
Gravimètre de référence FG5 actuellement commercialisé par Micro-G Solutions

46

Texte de Faller et Hammond.

Ecole d'Été 2010 du GRGS Mesures et traitement de gravimétrie terrestre Sylvain Bonvalot Institut de Recherche pour le Développement (IRD) Bureau Gravimétrique International (BGI) UMR5563 UMR5563 – Observatoire Midi Pyrénées , 14 av. E. , 14 av. E. Belin, 31400 Toulouse , 31400 Toulouse sylvain.bonvalot@ird.fr

Synthèse :
le géoïde : quels sont les paramètres qui le « dessinent » ?



20/02/2023

marcel terrier La montée des eaux

47

Cours Préparation au CAPES Université Pierre & Marie Curie Par Mathieu RODRIGUEZ
rodriguez@geologie.ens.fr Pr. Agrégé en sciences naturelles & doctorant IStEP-ens

Conclusion:

Sur les 500 dernières années (entre autre) on constate des élévations et des baisses de niveau collectives qui mettent hors de cause les activités humaines dans l'élévation actuellement mesurée par les satellites et qui tempèrent les craintes que certains formulent sur ces sujets.

Les mesures sont difficiles à faire, les résultats sont incertains.

Mais les constats sont simples:

On ne constate nulle part des augmentations de niveau permanentes qui pourraient laisser craindre une submersion due aux augmentations de CO₂. Mais localement, des pompages des nappes phréatiques peuvent comme à Venise faire que les villes s'enfoncent. C'est la seule cause humaine démontrée!

Les chercheurs doivent encore poursuivre leurs efforts pour présenter une vue d'ensemble correcte des évolutions à long terme des niveaux pour rendre crédibles leurs prédictions et rendre leurs explications non contestables.

**Merci de votre attention,
Avez-vous des questions?**

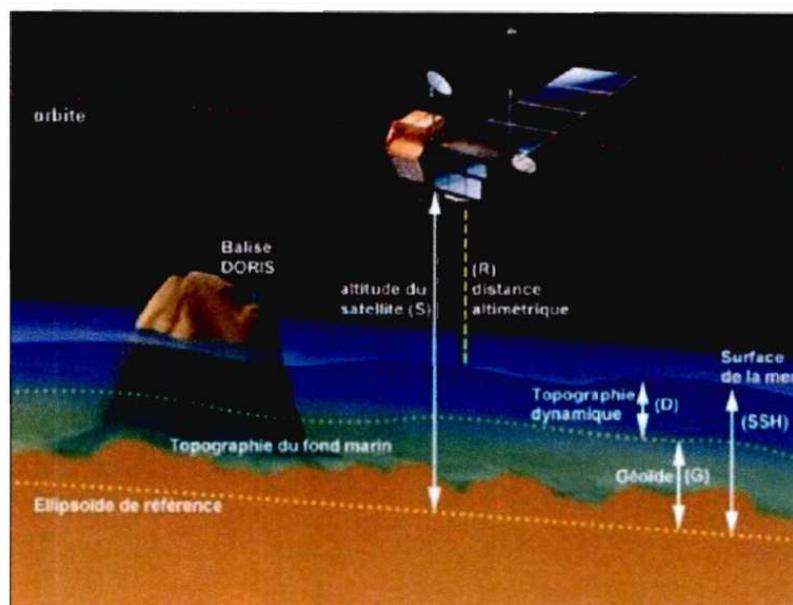


Figure 1.2: Mesure altimétrique (source : [5])

20/02/2023

50